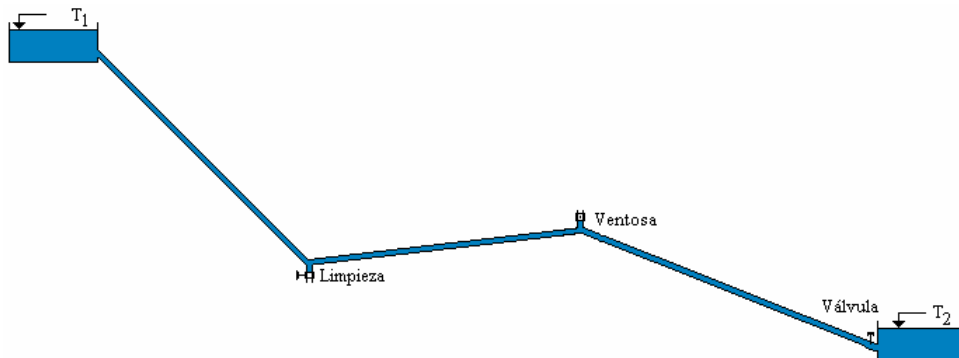


NOCIONES ELEMENTALES

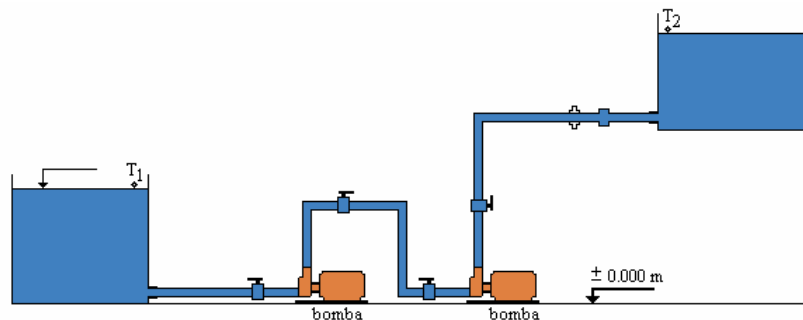
SOBRE

TUBERIAS Y BOMBAS



PROFESOR

LIONEL RAMON FERNANDEZ GEGNER



MATERIAL DE APOYO SUJETO A REVISION

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE CIVIL
DEPARTAMENTO DE HIDRAULICA
MERIDA – VENEZUELA
DICIEMBRE - 2005

Agradecimiento

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a:

Mi maestro, Julián Aguirre Pe, Director del CHIDRA, apoyo incondicional desde todo punto de vista y proveedor de ánimo en los momentos difíciles, cuando los resultados de la mediciones no eran satisfactorios, para continuar, hasta así obtenerlos.

José Mogollón y a Eduardo Jáuregui quienes de manera espontánea ayudaron a interpretar los resultados experimentales.

Alix Moncada y a María Luisa Oliveros por toda la colaboración prestada, cuando las circunstancias así lo requerían.

Mildred Pérez por la ayuda brindada cuando esta fue solicitada.

Personal del taller del Laboratorio de Hidráulica quien de una manera dedicada y aportando ideas construyó el equipo experimental y realizó las modificaciones que fueron necesarias.

Todas aquellas personas que de una u otra manera hicieron posible la culminación de este trabajo.

La Universidad de los Andes.

Lionel Fernández

INDICE

Capítulo 1

Generalidades	1-1
Determinación del consumo medio	1-10
Tamaño de la población	1-11
Método aritmético	1-12
Método del porcentaje decreciente	1-13
Tipos de tuberías	1-14
Tipos de unión en tuberías	1-17
Resistencia a la presión	1-28

Capítulo 2

Línea de aducción por gravedad	2-1
Línea de aducción por bombeo	2-1
Líneas de presiones en sistemas por gravedad	2-2
Líneas de presiones en bombeo por bombeo	2-3
Pérdidas por fricción	2-5
Pérdidas concentradas o menores	2-10
Golpe de ariete	2-15
Cierre instantáneo	2-17
Cierre lento	2-19
Tanquilla rompecarga	2-21
Ejemplos	2-24

Capítulo 3

Anclajes	3-1
Tuberías en zanjas	3-8
Relleno de la zanja	3-10
Tuberías superficiales	3-11
Válvulas	3-13
Ejemplos	3-23

Capítulo 4

Generalidades	4-1
Bombas de émbolo	4-1
Bombas centrífugas	4-2
Curvas características	4-3
Análisis dimensional	4-8
Leyes de semejanza	4-9
Bombas en sistemas de tuberías	4-11
Carga neta de succión positiva	4-14
Bombas en serie	4-16
Bombas en paralelo	4-18
Ejemplos	4-20

Capítulo 5

Análisis previos	5-1
Construcción del equipo experimental	5-7
Operación del equipo	5-15
Ejemplos	5-17

**Dedicado a:
mi esposa
Mayela,
a mis hijos
Lorena
Maye
Orlando
y a mis nietas
Verónica
e Isabel**

Capítulo 1

Generalidades

Con el fin de diseñar eficientemente un sistema de conducción de agua para abastecimiento de población se deben considerar los siguientes aspectos:

- Fuente de abastecimiento del agua
- Trazado del eje de la tubería
- Determinación del caudal de diseño
- Escogencia del material de la tubería
- Determinación del diámetro de la tubería
- Diseño de anclajes
- Colocación de piezas especiales

Fuente de abastecimiento del agua

En este punto se debe considerar la calidad del agua, la cantidad de agua necesaria para los fines previstos y la ubicación de las diferentes obras.

Calidad del agua

En la fuente se deben tomar muestras de agua con el fin de realizar análisis físicoquímicos y bacteriológicos para ver si la calidad del agua es adecuada para consumo humano, y se pueden establecer, según las normas para el abastecimiento de agua potable de HIDROVEN, tres categorías.

Categoría A:

Están constituidas por aquellas fuentes cuyas aguas, de calidad natural, pueden ser consumidas como agua potable, solamente añadiéndole un producto desinfectante.

Categoría B:

Están constituidas por aquellas fuentes cuyas aguas, en calidad natural, pueden ser consumidas, como agua potable, después de un tratamiento normal, de sedimentación, filtración y desinfección.

Categoría C:

Están constituidas por aquellas fuentes cuyas aguas, de calidad natural, pueden ser consumidas como agua potable, después de un tratamiento completo, de coagulación, sedimentación, filtración y desinfección.

Cantidad de agua

Se deben realizar los estudios hidrológicos necesarios con el fin de determinar si la cantidad de agua aportada por la fuente es suficiente para satisfacer la demanda de la población futura a servir.

En caso afirmativo, si la fuente es agua subterránea, se extrae el caudal necesario y si la fuente es superficial, como es el caso de un río, se podría construir un dique toma para captar parte del caudal y permitir que el resto continúe hacia aguas abajo, con el fin de satisfacer las necesidades de conservación de la flora, la fauna y otras comunidades.

En caso negativo, se debe estudiar la posibilidad de construir un embalse con el fin de almacenar los excedentes de agua provenientes de las épocas de alto escurrimientos y utilizarlas en épocas de bajo escurrimiento donde hay déficit, si esto no es económicamente factible, simplemente se satisface una parte de la demanda y el resto de la demanda se satisface desde otra fuente.

Ubicación del sitio de toma

Para ubicar el sitio de la toma, se debe recorrer la zona y entre los diferentes sitios posibles, escoger aquel que reúna las mejores condiciones en cuanto a los aspectos siguientes:

- Facilidad de acceso; es decir, que existan vías de penetración o sean fáciles de construir.
- Sitio de buena geología.
- Sitios adecuados para la construcción del dique toma y desarenador.
- Que los costos de las construcciones sean relativamente bajos.

Trazado del eje de la tubería

Con la finalidad de realizar el trazado de la tubería, se debe recorrer el terreno para observar las depresiones, elevaciones, pasos difíciles, terrenos rocosos, terrenos con arcillas expansivas, propietarios, tipos de cultivos, pasos por carreteras, pasos en puentes, construcciones, líneas eléctricas, acceso para la construcción y el mantenimiento de la obra y otros detalles que se consideren de interés. Se realizan varios trazados tentativos y se escoge aquel que reúna las mejores condiciones en base a economía y seguridad de las instalaciones.

Una vez decidido el trazado definitivo se procede a realizar el levantamiento topográfico de la zona, en una franja de unos 10.00 m a cada lado del eje de la tubería, con la finalidad de realizar los planos planimétricos y altimétricos necesarios para un adecuado diseño, ubicando: fuente, destino, trazado de la tubería, planta de tratamiento, estaciones de bombeo si fuera necesario, tanques de almacenamiento y otras obras de importancia.

Determinación del caudal de diseño

Si se tiene perfectamente definida el área a servir; es decir, se conoce la cantidad de viviendas unifamiliares, bifamiliares, multifamiliares, hoteles, planteles educativos, cines, áreas verdes, oficinas, industrias, etc; es decir, si existe un plano regulador de la ciudad, se procede a determinar la demanda de acuerdo a lo estipulado en las Normas Sanitarias existentes.

Si se adopta el criterio de la dotación per cápita, la determinación del consumo medio se hará para la población futura proyectada en el período de diseño económico que se establezca. Este consumo se verá afectado por un factor de seguridad, considerándose el caudal de diseño igual a 1.25 el caudal medio.

Escogencia del material de la tubería

En obras de gran importancia, donde la población a servir es considerable, se debe garantizar un servicio 100 % confiable; en este caso es recomendable colocar tubería de acero. En obras de menor importancia se puede usar policloruro de vinilo (PVC), polietileno de alta densidad (PEAD) u otro material más económico.

La clase o el espesor de la tubería debe determinarse de tal manera que ésta soporte las máximas presiones de trabajo, escogiendo los espesores por tramos de manera que la obra sea lo más económica posible.

Determinación del diámetro de la tubería

El diámetro debe determinarse de tal manera que circule el caudal requerido de acuerdo con la demanda futura, la velocidad media del agua en la tubería debe ser mayor que 0.60 m/s, con el fin de evitar que se produzca sedimentación de las partículas transportadas por el agua y no mayor de 3.00 m/s, con el fin de evitar que se produzcan vibraciones.

Diseño de anclajes

En los lugares donde exista cambio de alineación del eje de la tubería, cambio de diámetro o ambas cosas es necesario determinar las fuerzas que existen con el fin de diseñar bloques de anclaje para mantener la tubería en la posición indicada.

Colocación de piezas especiales

En los lugares adecuados se deben colocar los accesorios necesarios con el fin de garantizar el perfecto funcionamiento del sistema, tales como válvulas de compuertas, de purga, ventosas de admisión y expulsión de aire, juntas Dresser, válvulas de control de niveles en los tanques, bombas y cualquier otro accesorio que sea necesario.

Una vez realizado el proyecto definitivo se procede; con la memoria descriptiva de la obra, los planos generales y los planos de detalles a determinar las cantidades de obras de las diferentes partidas que formarían el presupuesto y con la determinación de los precios unitarios encontrar el costo total.

Una vez planificado el tiempo de ejecución de la obra, se procede a la construcción, realizando una rigurosa inspección con el fin de garantizar la calidad de la obra, para finalmente poner en funcionamiento el sistema de conducción de agua, en beneficio de la comunidad.

Determinación del consumo medio

Para la determinación del consumo medio existen dos criterios:

1. Consumo en base a la población futura a servir.
2. Consumo en base a las Normas Sanitarias sobre dotaciones.

Consumo en base a la población futura a servir

En zonas urbanas se considera que el consumo de agua de una persona, por día, es de unos 250 litros, cantidad que varía dependiendo del clima y del país, en las zonas rurales esta cantidad es menor, en este criterio esta cantidad es muy importante para la determinación del caudal medio al igual que la determinación de la población futura, la cual debe ser estimada por métodos estadísticos. Por ejemplo para una población futura de 300000 habitantes y un consumo de 250 l/p/día se tiene:

$$Q_m = \frac{300000 \times 250}{86400} = 868 \text{ l/s}$$

Consumo en base a las Normas Sanitarias sobre dotaciones

Es una forma más definida de determinar el caudal medio, usando el criterio de las Normas Sanitarias contenidas en la Gaceta Oficial número 752 Extraordinario del 26-02-62; para su correcta aplicación de debe conocer el plano de regulación urbana de la ciudad.

A continuación se presentan las dotaciones, tomadas de las Normas Sanitarias.

Artículo 90

Las dotaciones de agua para uso doméstico, comercial, industrial, riego de jardín y otros fines, se calcularán de acuerdo con lo establecido en el presente capítulo.

Artículo 91

Las dotaciones de agua para viviendas unifamiliares y bifamiliares se calcularán de acuerdo con el área de la parcela según se indica a continuación:

Vivienda Unifamiliar

Area de la parcela en m ²		Dotación en lts/día
Hasta	200	1500
201	300	1700
301	400	1900
401	500	2100
501	600	2200
601	700	2300
701	800	2400
801	900	2500
901	1000	2600
1001	1200	2800
1201	1400	3000
1401	1700	3400
1701	2000	3800
2001	2500	4500
2501	3000	5000
mayores de 3000		5000 más 100 lts/día por cada 100 m ² de superficie adicional

En caso de vivienda bifamiliar se añadirán 1500 lts/ día a la dotación indicada

Nota: Estas cifras indican dotación doméstica y riego de jardín.

Artículo 92

Las viviendas multifamiliares deberán estar dotadas de agua potable de acuerdo con el número de dormitorios de cada apartamento, según la siguiente tabla:

Número de dormitorios por apartamento	Dotación lts/día / apartamento
1	500
2	850
3	1200
4	1350
5	1500

Artículo 93

Las dotaciones de agua para hoteles, pensiones y hospedajes, se calcularán de acuerdo con la siguiente tabla:

Tipo de establecimiento	Dotación
Hotel	500 lts/día / dormitorio
Pensión	350 lts/día / dormitorio
Hospedaje	25 lts/día / m ² de dormitorio

Nota: Las dotaciones de agua para riego y servicios anexos a los establecimientos de que se trata este artículo, tales como restaurantes, bares, lavanderías, comercios y similares, se calcularán de acuerdo a lo estipulado en estas Normas para cada caso.

Artículo 94

Las dotaciones de agua para restaurantes se calcularán en función del área de los locales y de acuerdo con la siguiente tabla:

Area de los locales en m²	Dotación diaria
Hasta 40	2000 lts
41 a 100	50 lts/m ²
más de 100	40 lts/m ²

Nota: En aquellos restaurantes donde también se elaboren alimentos para ser consumidos fuera del local, se calculará una dotación complementaria a razón de 8 lts/cubierto preparado para ese fin.

Artículo 95

La dotación de agua para planteles educacionales y residencias estudiantiles se calcularan de acuerdo con la siguiente tabla:

	Dotación diaria lts/persona
Alumnado externo	40
Alumnado semi-interno	70
Alumnado interno o residente	200
Personal no residente	50
Personal residente	200

Nota: Las dotaciones de agua para riego de áreas verdes, piscinas y otros fines, se calculará adicionalmente de acuerdo con lo estipulado en estas Normas para cada caso.

Artículo 96

Las dotaciones de agua para cines, teatros, auditorios, cabarets, casinos, salas de baile y espectáculos al aire libre, se calcularán de acuerdo a la siguiente tabla:

Tipos de establecimientos	Dotación diaria
Cines, teatros y auditorios	3 lts/asiento
Cabarets, casinos y salas de baile	30 lts/m ² de área para uso público
Estadios, velódromos, autódromos, plazas de toros y similares	1 lt/espectador
Circos, hipódromos, parques de atracciones y similares	1 lt/espectador más la dotación requerida para el mantenimiento de los animales

La dotaciones para riego de áreas verdes, aire acondicionado y servicios anexos, se calcularán adicionalmente de acuerdo con lo estipulado en estas Normas para cada caso.

Artículo 97

Las dotaciones de agua para piscinas de recirculación y de flujo continuo, se calcularán de acuerdo con las siguientes cifras:

Con recirculación de las aguas del rebose	10 lts/día / m ² de proyección horizontal de la piscina
Sin recirculación de las aguas del rebose	25 lts/día
Con flujo continuo	125 lts/hora / m ³

La dotación de agua requerida para piezas sanitarias en los vestuarios y cuartos de aseo anexos a las piscinas, se calculará adicionalmente a razón de 30 lts/día/m² de proyección horizontal de la piscina. En aquellos casos en que se contemplen otras actividades recreacionales, se aumentará se aumentará proporcionalmente esta dotación.

Artículo 98

La dotación de agua para oficinas se calculará a razón de 6 lt/día/m² de área útil del local.

Artículo 99

La dotación de agua para depósito de materiales, equipos y artículos manufacturados, se calculará a razón de 0.50 lts/día / m² de área útil del local y por cada turno de trabajo de 8 horas o fracción.

Cuando la dotación de agua calculada resulte menor de 500 lts/día, deberá asignarse esta cantidad como mínimo. En caso de existir oficinas anexas, el consumo de las mismas se calculará adicionalmente, de acuerdo a lo estipulado en estas Normas para cada caso.

Artículo 100

La dotación de agua para comercios de mercancías secas, casa de abastos, pulperías, carnicerías y pescaderías se calculará a razón de 20 lts/día/m² de área del local, considerándose una dotación mínima de 400 lts/día.

Artículo 101

La dotación de agua para mercados se calculará a razón de 15 lts/día por m² de área útil de local.

Las dotaciones de agua para locales con instalaciones sanitarias separadas, tales como restaurantes y comercios, se calcularán adicionalmente, de acuerdo con lo estipulado en estas Normas para cada caso.

Artículo 102

La dotación de agua para consumo humano en cualquier tipo de industria, se calculará a razón de 80 lts/día por trabajador o empleado, por cada turno de trabajo de 8 horas o fracción.

El agua para consumo industrial, deberá calcularse de acuerdo con la naturaleza de la industria o el proceso de manufactura. Queda a juicio de la autoridad sanitaria el verificar tales dotaciones cuando lo crea necesario.

La dotación de agua para oficinas y depósitos propios de la industria; servicios anexos, tales como comercios y restaurantes; y riego de áreas verdes, se calculará adicionalmente de acuerdo a lo estipulado en estas Normas para cada caso.

Artículo 103

La dotación de agua para plantas de producción e industrialización de leche, y sus anexos, se calculará de acuerdo con las cifras que se indican a continuación

Estaciones de recibo y enfriamiento	1500 lts por cada 1000 lts de leche recibidos por día.
Plantas de pasteurización	1500 lts por cada 1000 lts de leche pasteurizada por día.
Fábricas de mantequilla, queso o leche en polvo	1500 lts por cada 1000 lts de leche a procesar por día.

Artículo 104

La dotación de agua para estaciones de servicio, bombas de gasolina, garages y estacionamientos, se calculará de acuerdo con la siguiente tabla:

Para lavado automático	12800 lts/ día por unidad de lavado
Para lavado no automático	8000 lts/día por unidad de lavado
Para bombas de gasolina	300 lts/día por bomba
Para garages y estacionamientos cubiertos	2 lts/día por m ² de área
Para oficina y venta de repuestos	6 lts/día por m ² de área útil

El agua necesaria para riego de áreas verdes y servicios anexos, tales como restaurantes y fuentes de soda, se calculará adicionalmente de acuerdo con lo estipulado en estas Normas para cada caso.

Artículo 105

Las dotaciones de agua para edificaciones destinadas al alojamiento de animales tales como caballerizas, establos, porquerizas, polleras y similares, se calcularán en base a las cifras indicadas en la tabla siguiente:

Ganado lechero	120 lts/día por animal
Bovinos	40 lts/día por animal
Equinos	40 lts/día por animal
Porcinos	10 lts/día por animal
Pollos y gallinas, pavos, patos, gansos	20 lts/día por cada 100 aves

Las cifras anteriores no incluyen las dotaciones para riego de áreas verdes y otras instalaciones.

Artículo 106

La dotación de agua para mataderos públicos o privados, se calculará de acuerdo con el número y clase de animales a beneficiar así:

Clase de animal	Dotación diaria
Bovinos	500 lts/animal
Porcinos	300 lts/animal
Ovinos y caprinos	250 lts/animal
Aves en general	16 lts por cada kg en vivo

Artículo 107

La dotación de agua para bares, fuentes de soda, refresquerías, cafeterías y similares se calculará de acuerdo con la siguiente tabla:

Area de locales en m ²	Dotación diaria
Hasta 30	1500 lts
De 31 a 60	60 lts/m ²
De 61 a 100	50 lts/m ²
Mayor de 100	40 lts/m ²

Artículo 108

La dotación de agua para hospitales, clínicas de hospitalización, clínicas dentales, consultorios médicos y similares, se calculará de acuerdo con la siguiente tabla:

Hospitales y clínicas con hospitalización	800 lts/día por cama
Consultorios médicos	500 lts/día por consultorio
Clínicas dentales	1000 lts/día por unidad dental

El agua requerida para servicios especiales, tales como riego de áreas verdes, se calculará adicionalmente de acuerdo con lo estipulado en estas Normas para cada caso.

Artículo 109

La dotación de agua para lavanderías, lavanderías al seco, tintorerías y similares, se calculará de acuerdo con la siguiente tabla:

Lavanderías	40 lts/kg de ropa
Lavanderías al seco y similares	30 lts/kg de ropa

Artículo 110

El agua requerida para la extinción de incendios se calculará de acuerdo con lo estipulado en el Capítulo respectivo de estas normas.

Artículo 111

La dotación de agua para áreas verdes se calculará a razón de 2 lts/día por m². No se requerirá incluir áreas pavimentadas, engrazonadas u otras no sembradas para los fines de esta dotación.

Artículo 112

En los casos no contemplados en este Capítulo, la autoridad sanitaria fijará la dotación correspondiente.

Tamaño de la población

La determinación del caudal, para el diseño de las obras de abastecimiento de agua para una determinada comunidad dependerá de la población futura a servir, el diseño debe realizarse considerando esta población y la vida útil de los diferentes componentes del sistema.

En general los períodos de diseño económicos oscilan entre 10 y 40 años existiendo las siguientes recomendaciones generales:

Fuentes superficiales sin almacenamiento:

El río debe ser capaz de proveer un caudal mínimo para satisfacer la población futura de 20 a 30 años.

Fuentes subterráneas:

El acuífero debe ser capaz de satisfacer una demanda futura de 20 a 30 años, el aprovechamiento es por etapas, mediante la perforación de pozos con períodos de diseño menores de 10 años.

Obras de captación:

Dependiendo de la importancia de la obra se pueden utilizarse períodos de diseño entre 20 y 40 años.

Estaciones de bombeo:

Bombas y motores con períodos entre 10 y 15 años y se debe realizar un mantenimiento adecuado.

Líneas de aducción:

El período de diseño recomendado está entre 20 y 40 años y se hace necesario un análisis económico para obras de gran importancia.

Tanques de almacenamiento:

El período recomendado es entre 30 y 40 años para tanques de concreto.

Redes de distribución:

Las redes de distribución deben de diseñarse para el completo funcionamiento del área a servir.

El crecimiento de la población es fundamental en el diseño, pero es muy difícil de determinar ya que depende de diferentes factores entre los que podemos citar los económicos, ambientales y desarrollo industrial.

No se puede prever una tendencia de crecimiento ni se puede predecir cuando se invertirá. La guerra, los cambios de técnicas industriales, los nuevos descubrimientos científicos y otros factores pueden causar cambios bruscos en el crecimiento de la población y ningunos de los métodos de pronóstico sobre crecimiento de población puede considerar estos cambios.

Puede considerarse limitación física en el crecimiento de la población como el caso de barreras geográficas. Los pueblos cercanos a grandes ciudades, con frecuencia pueden esperar un rápido crecimiento de personas que se residencien en estos pueblos y trabajen en las ciudades cercanas, siempre que no existan grandes dificultades de transporte.

Se debe realizar un estudio demográfico con el fin de determinar la población futura a servir. Los estudios serán realizados mediante la aplicación de los métodos probabilísticos a los datos aportados por la Oficina Central de Estadística e Informática (O.C.E.I)

Entre los métodos para la predicción de la población futura tenemos:

1. Método aritmético
2. Método geométrico
3. Método del porcentaje decreciente
4. Método del aumento incremental
5. Método gráfico
6. Métodos analíticos (Newton, Lagrange, mínimos cuadrados)

A manera de ilustración se muestran algunos métodos para predicción de población.

Método aritmético

El crecimiento aritmético considera que la variación de la población con respecto al tiempo es constante, es decir, la variación es lineal, lo cual se puede representar en un sistema coordenado como se muestra en la Fig.1-1

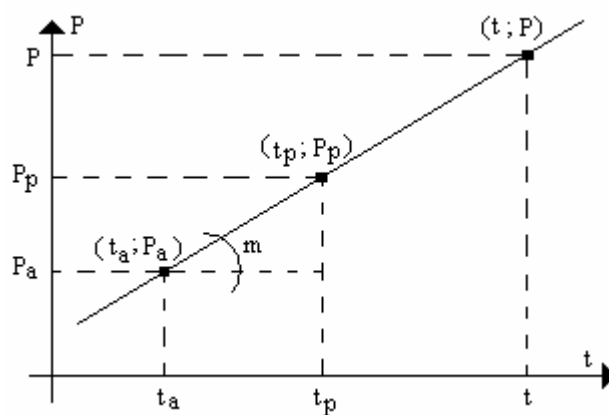


Fig. 1-1 Gráfico de crecimiento lineal de la población.

La ecuación de la recta es

$$P - P_p = m (t - t_p) \quad \text{ec. 1.1}$$

$$P = P_p + m (t - t_p) \quad \text{ec. 1.2}$$

donde

P_a representa la población anterior
 P_p representa la población presente
 P representa la población futura
 t_a representa el tiempo anterior
 t_p representa el tiempo presente
 t representa el tiempo futuro

La pendiente de la recta se puede expresar como:

$$m = \frac{P_p - P_a}{t_p - t_a} \quad \text{ec. 1.3}$$

al sustituir se obtiene

$$P = P_p + \frac{P_p - P_a}{t_p - t_a} (t - t_p) \quad \text{ec. 1.4}$$

Método geométrico

El crecimiento geométrico considera que la variación de la población con respecto al tiempo es proporcional a la población, lo cual se puede expresar como:

$$\frac{dP}{dt} = kP \quad \text{ec. 1.5}$$

al separar variables e integrar entre los límites, presente y anterior obtenemos:

$$\frac{dP}{P} = k dt \Rightarrow \int_{P_a}^{P_p} \frac{dP}{P} = \int_{t_a}^{t_p} k dt \Rightarrow \log P_p - \log P_a = k(t_p - t_a) \Rightarrow k = \frac{\log P_p - \log P_a}{t_p - t_a} \quad \text{ec. 1.6}$$

si la expresión anterior se integra entre los límites, futuro y presente se obtiene:

$$\frac{dP}{P} = k dt \Rightarrow \int_{P_p}^{P_f} \frac{dP}{P} = \int_{t_p}^{t_f} k dt \Rightarrow \log P_f - \log P_p = k(t_f - t_p) \Rightarrow k = \frac{\log P_f - \log P_p}{t_f - t_p} \quad \text{ec. 1.7}$$

si se igualan las expresiones de k se obtiene:

$$\frac{\log P_p - \log P_a}{t_p - t_a} = \frac{\log P_f - \log P_p}{t_f - t_p} \quad \text{ec. 1.8}$$

$$\log P = \log P_p + \frac{t - t_p}{t_p - t_a} (\log P_p - \log P_a) \quad \text{ec. 1.9}$$

la cual se puede expresar como:

$$P = \left(\frac{P_p}{P_a} \right)^{\left(\frac{t - t_p}{t_p - t_a} \right)} \quad \text{ec. 1. 10}$$

Método del porcentaje decreciente

Este análisis puede hacerse de una forma gráfica por lo que se recomienda para períodos largos y grandes poblaciones, aplicable solo cuando los censos son a intervalos constantes y presente una tendencia uniforme que permitan extrapolar los valores.

Para cada intervalo de censo se calcula la tasa de crecimiento de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\text{Tasa de crecimiento (\%)} = \frac{P - P_a}{P_a} \times 100 \quad \text{ec. 1.11}$$

Se calcula la marca de clase para cada intervalo en años.

Se grafica la tasa de crecimiento contra la marca de clase y se extiende la curva si existe una marcada tendencia.

Para los años siguientes y hasta la fecha deseada se determinan los valores de la tasa de crecimiento y se despeja la población final, como se indica en la Fig. 1-2

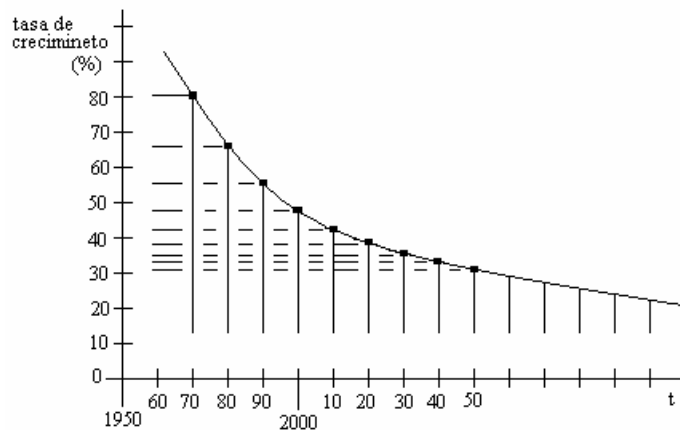


Fig. 1-2 Método gráfico del porcentaje decreciente.

Tipos de tuberías

En los proyectos de acueductos, la tubería es el elemento principal del sistema y debe analizarse el tipo de material a utilizarse con el fin de lograr el mejor diseño. Estas se fabrican con los más diversos materiales y se debe escoger el más adecuado, considerando diferentes factores entre los cuales se pueden enumerar:

1. Importancia de la obra
2. Disponibilidad en el mercado
3. Resistencia estructural a las diferentes condiciones de trabajo, cargas exteriores y presiones interiores.
4. Resistencia a la acción del agua, el suelo y la atmósfera.
5. Condiciones de rugosidad.
6. Facilidad de transporte e instalación.
7. Costo.

Entre los diferentes materiales con los cuales se construyen las tuberías tenemos:

Hierro fundido (HF)
Hierro fundido dúctil (HFD)
Hierro galvanizado (HG)
Acero (A)
Policloruro de vinilo (PVC)
Polietileno de alta densidad (PEAD)
Cobre (C)

Existen otros materiales, de menor uso en la actualidad, tales como: fibra de vidrio, aluminio, vidrio

Hierro fundido (HF)

Están formadas por hierro, carbón, coke y piedra caliza, estos se funden y se pueden colar o vaciar en moldes giratorios donde la fuerza centrífuga del giro reparte y compacta el material.

Son resistentes a la oxidación pero el carbón las hace muy frágiles por lo que es adecuada para colocarlas en zanjas, protegida de los impactos.

La mayoría son tratadas con mortero de cemento en su interior con el fin de prevenir el aumento de la rugosidad por incrustaciones de minerales existentes en el agua.

Son más costosas que otros materiales y se fracturan bajo condiciones de carga excesiva por ser muy rígidas.

La unión se realiza mediante el sistema de espiga – campana.

El valor de C correspondiente a la rugosidad de la ecuación de Hazen-Williams es de 100 y se fabrican generalmente de 12 m de longitud.

Hierro fundido dúctil (HFD)

Están formadas por hierro, carbón, piedra caliza y magnesio, siendo este último el elemento que la hace menos frágil, y resulta más adecuada por lo que se puede colocar superficialmente o enterrada.

La menor fragilidad y su menor peso las hace más adecuadas que las de HF.

La unión se realiza mediante el sistema de espiga – campana.

El valor de C correspondiente a la rugosidad de la ecuación de Hazen-Williams es de 100 y se fabrican generalmente de 12 m de longitud.

Hierro galvanizado (HG)

Se fabrican mediante el proceso de templado del acero lo que la hace de gran ductilidad y resistencia a los impactos.

Mediante el proceso de galvanizado se le coloca un recubrimiento de zinc tanto en el interior como en el exterior dándole una protección contra la corrosión.

Por sus características es recomendable instalarlas superficialmente ya que presentan gran resistencia a los impactos, no es adecuado colocarlas enterradas en zanjas debido a la acción de los suelos ácidos. En caso necesario se le debe colocar una protección exterior de concreto a asfalto. Es adecuada colocarla en el interior de las edificaciones.

La unión se realiza mediante el sistema de rosca.

El valor de C correspondiente a la rugosidad de la ecuación de Hazen-Williams está comprendido entre 100 y 110, se fabrican generalmente de 6.40 m de longitud.

Acero (A)

Hay una gran variedad de aceros que dependen de los elementos que se usan durante su fabricación. Actualmente se usan con costura o sin costura, se usan para conducir cualquier tipo de fluido, donde existan grandes presiones y en obras de gran importancia donde no se permite la falla de la tubería.

Existen diferentes aleaciones que las hacen muy resistentes pero a un elevado costo.

La unión se realiza mediante el sistema de soldadura.

El valor de C correspondiente a la rugosidad de la ecuación de Hazen-Williams es de 120 para tuberías de acero, revestidas interiormente con polímeros.

Policloruro de vinilo (PVC)

Formada por plastificación de polímeros, no es recomendable exponerla a la radiación solar ya que el material se cristaliza y se hace muy frágil.

Entre las ventajas se pueden enumerar:

1. Baja rugosidad.
2. Fácil de transportar.
3. Fácil de instalar.
4. Costo de transporte económico.
5. Inertes a la corrosión.
6. Económicas.

Entre las desventajas se pueden enumerar:

1. Poca resistencia a los impactos y al aplastamiento.
2. Solo es recomendable colocarlas en zanjas con recubrimiento de arena o cemento pobre.

La unión se realiza mediante el sistema de espiga - campana

El valor de C correspondiente a la rugosidad de la ecuación de Hazen-Williams es de 140, se fabrican generalmente de 6.00 m y 12.00 m de longitud.

Polietileno de alta densidad (PEAD)

Tiene las ventajas descritas en la tubería anterior, son muy fáciles de instalar y se deben colocar enterradas, se fabrican en rollos de 50.00 m y 100.00 m para diámetros pequeños, hasta de, 125 mm y en tuberías de 6.00 m y 12.00 m, para diámetros mayores.

La unión se realiza mediante el sistema de piezas especiales con roscas para diámetros pequeños y por termofusión para diámetros grandes.

Cobre

Las tuberías de cobre se utilizan para realizar las tomas domiciliarias entre la tubería principal o matriz y la entrada de la edificación donde se colocará el medidor de consumo e instalaciones en el interiores de las edificaciones el sistema de unión es mediante copas de bronce con rosca o mediante soldadura con plata estos sistemas de acoplamiento son rápidos, seguros y confiables

Ventajas

Resistente a la corrosión

Alta seguridad

Fácilmente conformables

Material ligero

Baja pérdida de carga

Propiedades bactericidas y fungicidas

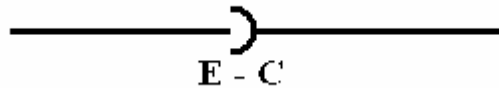
Las tuberías para acueductos son fabricadas, generalmente, de 3.00 m, 6.00 m y 12.00 m de largo y actualmente también en rollos de PEAD de 50.00 m y 100.00 m, para colocarlas en los sistemas de conducción deben ser unidas adecuadamente con el fin de garantizar la estanquidad de la junta, garantizando así, que no existirá fuga de agua. Existe una gran variedad de uniones entre las cuales tenemos:

Tipos de unión en tuberías (juntas)

- Espiga campana
- Bridas
- Rosca
- Tipo Dresser
- Soldadura
- Termofusión a tope

Unión espiga campana

El extremo de aguas debajo de la tubería es una punta o espiga la cual se introduce en una campana existente en el extremo de aguas arriba de la siguiente tubería, esto generalmente se simboliza en los planos con el siguiente esquema:



Con el fin de garantizar la estanquidad, existen diferentes métodos de unión entre los cuales podemos citar:

Unión con anillo de goma
Unión con soldadura líquida
Unión con mecate alquitranado y plomo

Unión con anillo de goma

En este caso en el interior de la campana existe una cavidad en la cual se coloca un anillo de goma especialmente diseñado, el procedimiento de instalación es el siguiente:

1. Asegurarse que el interior de la campana y la espiga estén limpios y sin arena u otro material para evitar que esto pueda interferir con el acoplamiento del tramo.

2. Lubrique la espiga, preferiblemente con el lubricante recomendado por el fabricante, pero en su defecto se podría usar, manteca vegetal, grasa animal o una solución jabonosa. No se recomienda usar aceites derivados del petróleo ya que podrían causar daño en los anillos de goma.
3. Coloque el anillo de goma en la cavidad existente en el interior de la campana.
4. Introduzca la espiga en la campana, hasta la marca indicada por el fabricante en la espiga.
5. Si se encuentra resistencia al acople, o la tubería es de gran diámetro, utilice una barra, como palanca, en el otro extremo de la tubería a insertar protegiéndola con un listón de madera, en casos de tuberías de hierro fundido muy pesadas se deben utilizar equipos mecánicos con el fin de introducir la espiga en la campana.

En la Fig. 1-3 se muestra una tubería con extremos espiga campana y una unión estándar y una unión mecánica flexible.

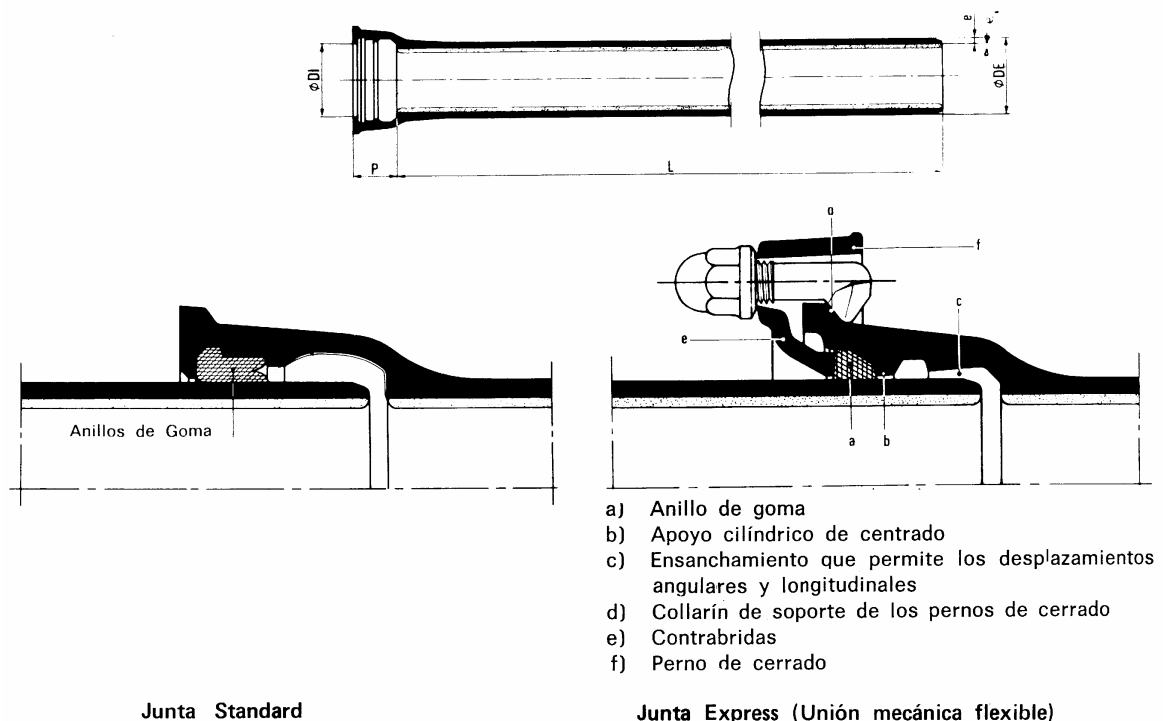


Fig. 1-3 Unión standard y mecánica flexible en tuberías.

Unión con soldadura líquida

En este caso no se usa anillo de goma, el procedimiento es el siguiente:

1. Presentar los tubos o tubo y accesorio, sin soldadura con el fin de verificar su posición.
2. Limpiar la espiga y la parte interior de la campana con el líquido indicado por el fabricante con un trapo limpio y sin grasa.
3. Con una brocha aplicar uniformemente soldadura líquida en la espiga.
4. introducir rápidamente el espiga en la campana y girar un cuarto de vuelta hasta ponerlo en la posición deseada.

Unión con mecate alquitranado y plomo

Generalmente se usa para tuberías de hierro negro que conducen aguas servidas según el procedimiento siguiente:

1. Se coloca un mecate alquitranado en el interior de la campana compactándolo con las herramientas apropiadas.
2. Se calientan barras de plomo sólido en crisoles apropiados con un soplete, hasta alcanzar el punto de fusión.
3. Se vierte en el interior de la campana el plomo líquido.
4. Finalmente se compacta el plomo con las herramientas apropiadas, logrando así la estanquidad de la junta.

Unión mediante bridas

Están formadas por un disco el cual posee un orificio central igual al diámetro de la tubería y varios orificios perimetrales que se utilizan para colocar los tornillos necesarios con el fin de unir las tuberías con piezas especiales como bombas, tanques etc; que ya poseen bridas o con codos, tee, u otras tuberías.

En la Fig. 1 - 4, se muestra una brida típica con cuello para soldar y una brida ciega.

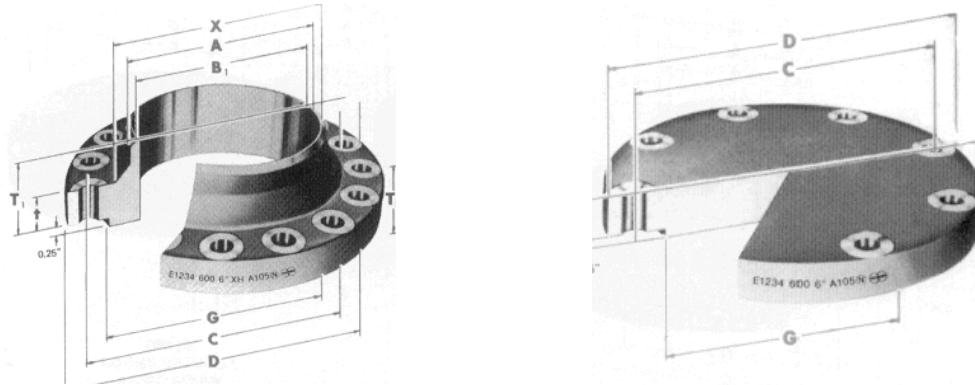


Fig. 1 – 4 Brida típica con cuello para soldar y brida ciega

La unión se hace colocando una empacadura entre las dos bridas y fijándola mediante tornillos con el fin de garantizar la impermeabilidad de la junta.

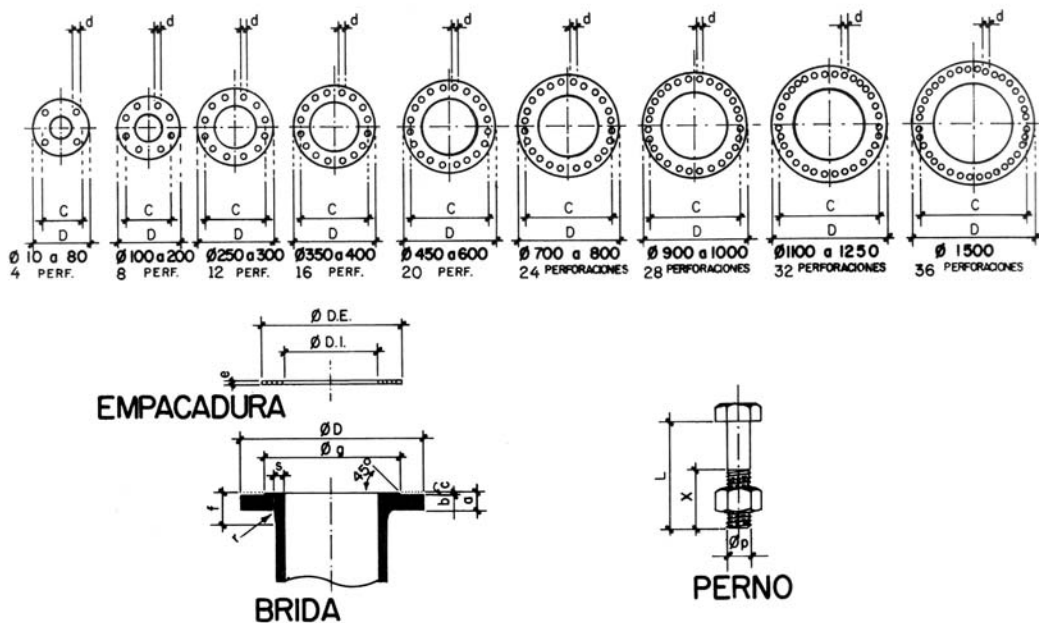
La ventaja de este tipo de unión radica en el hecho de que al estar unidas mediante tornillos permiten un rápido montaje y desmontaje con el objeto de realizar reparaciones o mantenimiento, lo cual se usa adecuadamente en estaciones de bombeo.

Los tipos más comúnmente utilizada son:

- Brida con cuello para soldar.
- Brida deslizante, es simplemente un disco que se une al extremo de la tubería mediante soldadura.
- Brida con rosca, se pueden colocar en los extremos de las tuberías con roscas y sin la necesidad de utilizar soldadura.
- Brida loca con tubo rebordeado, que puede ser de metal o de PVC, y puede girar alrededor del cuello, lo que permite colocar los orificios para tornillos en cualquier posición.
- Brida ciega, es un disco sólido sin orificio, para impedir el paso del fluido, se usa como tapón, el cual puede ser removido cuando existan futuras ampliaciones.

En la Fig. 1 - 5 se muestran las Bridas Standard ISO (norma internacional) y DIN (Norma Alemana)

BRIDAS STANDARD ISO (NORMA INTERNACIONAL) Y DIN



TUBERIA Ø NOMINAL	PERFORACION			EMPACADURA				PERNO			TUBERIA Ø NOMINAL	APROX A.S.A. pulg	OBSERVACIONES
	D	C	Nº	Ø d	D.I.	D.E.	s	Ø p	L	X			
10	90	60	4	15				12			10		
15	95	65	4	15				12			15		
20	105	75	4	15				12			20		
25	115	85	4	15				12			25		
32	140	100	4	19				16			32		
40	150	110	4	19	50	83	3	16	65	38	40	2	
50	165	125	4	19	60	98	3	16	65	38	50		
60	175	135	4	19	70	108	3	16	65	38	60		
80	200	160	4	19	90	133	3	16	65	38	80		
100	220	180	8	19	110	153	3	16	65	38	100	3,1/2	
125	250	210	8	19	135	183	3	16	65	38	125	5	
150	285	240	8	23	160	209	3	20	80	46	150	6	
175	315	270	8	23	185	239	3	20	80	46	175		
200	340	295	8	23	210	264	3	20	80	46	200	8	
250	395	350	12	23	260	319	3	20	100	46	250		
300	445	400	12	23	310	357	3	20	100	46	300		
350	505	460	16	23	360	427	4	20	100	46	350		
400	565	515	16	28	410	477	4	24	90	54	400		
450	615	565	20	28	460	527	4	24	90	54	450		
500	670	620	20	28	510	582	4	24	90	54	500		
600	780	725	20	31	610	682	4	27	110	60	600		
700	895	840	24	31	710	797	5	27	120	60	700		
800	1015	950	24	34	810	904	5	30	130	72	800		
900	1115	1050	28	34	910	1004	5	30	140	72	900		
1000	1230	1160	28	37	1010	1111	5	33	150	78	1000		
1100	1340	1270	32	37	1110	1221	5	33	150	78	1100		
1250	1505	1430	32	40	1260	1378	5	36	160	84	1250		
1500	1785	1700	36	43	1510	1645	5	39	180	90	1500		

Fig. 1 - 5 Bridas Standard ISO (Norma Internacional) y DIN (Norma Alemana)

Unión roscada

Se usan generalmente, en el interior de las edificaciones o en acueductos rurales pequeños, entre tuberías y accesorios como codos, tees, reducciones, llaves, los cuales ya vienen fabricados con roscas.

Generalmente existen dos tipos de roscas; la cónica denominada NPT y la recta o cilíndrica denominada NPS. El tipo normal de tubería lleva rosca cónica interna o externa. Las roscas se tallan sobre un cono de 1/16" pulgada por pulgada de conicidad, medida sobre el diámetro, fijando así la distancia que un tubo entra dentro de un accesorio y asegurando junta hermética. La conicidad es tan ligera que no aparece en una representación a menos que se exagere, en la Fig. 1 – 6 se muestra se muestran las roscas Briggs (ASA B2.1-1960).

Los tramos de tubería deben ser cortados según las indicaciones de los planos para la unión de estas tuberías entre si o con los diferentes accesorios se deben construir, en sitio, las roscas, lo cual se realizan mediante una maquina denominada tarraja, que puede ser eléctrica o manual dependiendo de la magnitud de la obra.

Debido a la reducción en el espesor de la pared en le punto de roscado, la resistencia a la presión podría reducirse en un 50 %, por lo tanto no se recomiendan las conexiones roscadas en sistemas de tuberías que funcionen a alta presión.

El procedimiento de roscado es el siguiente:

1. Se corta la tubería a escuadra, es decir, formando un ángulo de 90° respecto al eje.
2. Se quita la rebaba o remueva el material no deseable proveniente del corte.
3. Se envuelve con cinta teflón de DuPont o similar alrededor de la longitud total de la rosca, empieza en el segundo hilo de la rosca y se envuelve en la dirección de la rosca para evitar que se desenrede cuando se aprieta la conexión sobre la tubería. Se traslapa cada vuelta por la mitad del ancho de la cinta.
4. Se enrosca la conexión en la tubería y se aprieta inicialmente a mano; luego con una llave de tubería apropiada. Se debe evitar sobre apretar ya que esto puede dañar la rosca de la tubería o el accesorio. Cuando se combinan sistemas roscados plásticos y metálicos, se recomienda insertar roscas machos plásticas en roscas metálicas hembras. En la Fig. 1 - 7 se muestra la unión de una tubería con un codo, anillos y teflón.

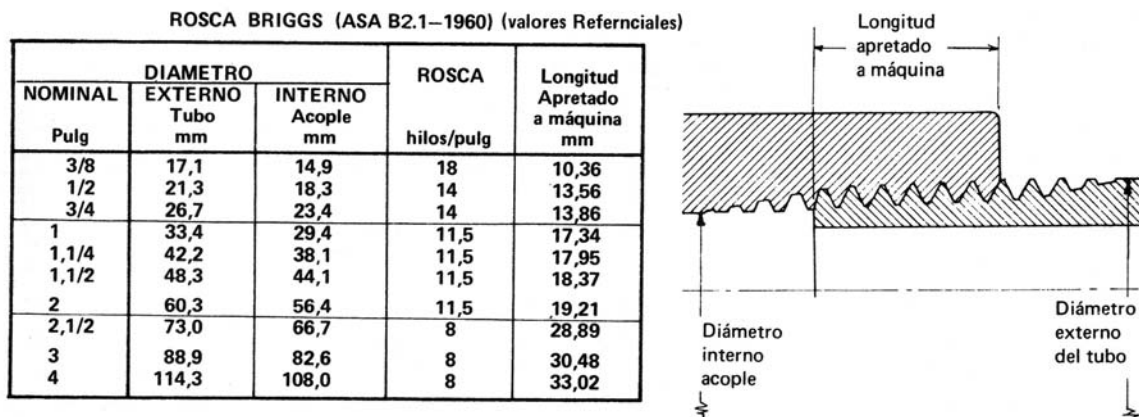


Fig.1 – 6 Detalle de la rosca Briggs (ASA B2.1 – 1960).



Fig 1– 7 Codo, anillo, unión y tubería de hierro galvanizado con sus respectivas roscas y rollo de Teflón.

Unión tipo dresser

Se usan para facilitar la movilización de los dispositivos, tales como bombas, válvulas, etc, que se instalan en las líneas de flujo, consisten en un anillo que se coloca en la parte exterior de las dos tuberías que se van a unir. Este anillo posee tornillos y tuercas perimetrales los cuales al apretarlos deforman el anillo permitiendo que este se adhiera a la tubería; la estanquidad de la junta se logra mediante dos anillos de goma ubicados en la parte interior de la junta. En la Fig. 1 – 8, se muestra un corte longitudinal esquemático de una junta dreseer.

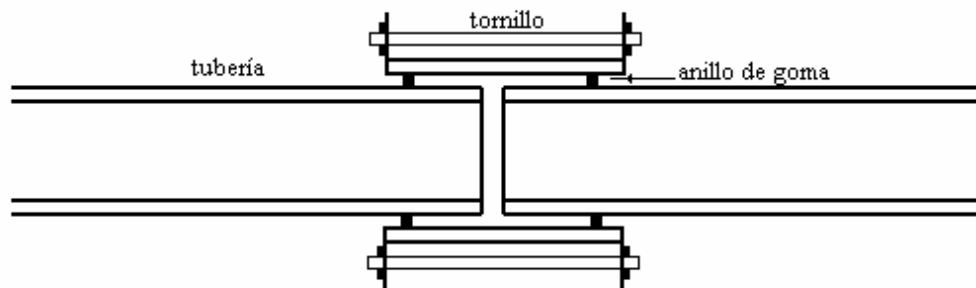


Fig. 1 – 8 Esquema de junta dreseer

Unión mediante soldadura

En general, cuando la obra es de gran importancia se utilizan tuberías de acero, en este caso, las uniones se realizan mediante soldaduras y los accesorios como bombas, válvulas, etc se colocan mediante bridas soldadas a la tubería, empackadura y tornillos, así se logran uniones seguras y capaces de absorber esfuerzos longitudinales, lo cual garantiza en la mayoría de los casos la estabilidad de la tubería. La soldadura se realiza espiga espiga según se indica en la Fig. 1 – 9.

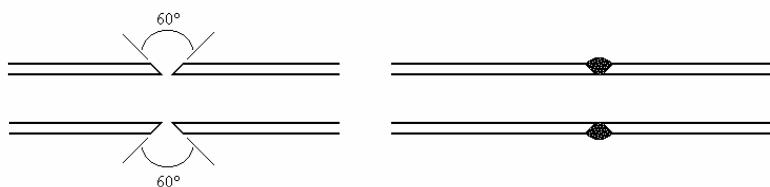


Fig. 1 – 9 Soldadura en tubería de acero espiga espiga.

Cuando se realiza soldadura, el personal debe tener especial cuidado respetando las reglas de seguridad con el fin de contar con la máxima protección personal y también proteger a las otras personas que trabajan a su alrededor. En la mayoría de los casos la protección es cosa de sentido común, los accidentes se pueden evitar utilizando los siguientes instrumentos de seguridad:

1. Máscara de soldar para proteger los ojos de los rayos ultravioleta e infrarrojos mediante el uso de vidrios inactínico, la cara y el cuello.

2. Guantes largos de cuero con costura interna para proteger manos y muñecas.
3. Delantal de cuero para protegerse de salpicaduras y exposiciones a rayos ultravioleta.
4. Zapatos de seguridad que cubren los tobillos para evitar las salpicaduras.
5. Gorro con el fin de proteger el cuero cabelludo
6. Evitar tener en los bolsillos materiales inflamable y usar ropa de material sintético, recomendándose el uso de tela de algodón.

El equipo consiste en una fuente de energía la cual puede ser fija o móvil, generalmente es móvil ya que las soldaduras se realizan a lo largo del trazado de la tubería, una máquina de soldar, electrodos, esmeriles, equipo de oxicorte, grúas, vehículos y herramientas menores.

El procedimiento es el siguiente:

1. Cortar la tubería según las indicaciones de los planos, este puede ser termico o mecánico.
2. El biselado se realiza con la ayuda de un esmeril angular de disco, y se permite un ángulo entre 30° y 45°.
3. El punteado consiste en fijar las partes a soldar mediante puntos de soldadura resistentes y situados de forma tal que impidan la deformación durante los pasos posteriores de soldadura.
4. Antes del pase de penetración se debe de limpiar los extremos a soldar de óxidos y grasas con el fin de impedir posibles defectos en la soldadura. El ancho y alto de este paso debe ser aproximadamente igual en toda su longitud, la escoria debe de ser removida en su totalidad.
5. Durante el pase de relleno se debe evitar que los empalmes coincidan con los empalmes del paso de penetración, pues la mayoría de los defectos de soldadura quedan ubicados en los empalmes.
6. Finalmente se realiza el pase de presentación, removiendo previamente toda la escoria existente. El control de calidad debe ser realizado por el especialista de la inspección mediante equipos especiales, si se presenta alguna inconformidad, es necesario que el soldador realice la reparación de la junta.

Termofusión a tope

Es un método de unión simple y rápido para unir tuberías de polietileno. Los extremos de las tuberías se calientan a la temperatura de fusión y luego se unen mediante la aplicación de presión con acción mecánica o hidráulica de acuerdo con el diámetro y espesor de la tubería y sin usar elementos adicionales para la unión, logrando una unión permanente e impermeable, normalmente se realiza con diámetros entre 32 mm y 630 mm.

Equipo:

Para realizar la unión a tope se debe disponer del siguiente equipo:

Equipo para unión térmica, con bancada, mordazas de fijación para diferentes diámetros, y sistema mecánico o hidráulico para movimiento de las tuberías.

Elemento de calefacción con temperatura variable

Rectificador para extremos de tubería

Disponibilidad de energía eléctrica (si no existe en la zona se debe disponer de un sistema portátil)

Procedimiento

1. Refrentar los tubos en la máquina rectificadora con el fin de garantizar la perpendicularidad del corte y asegurar así un perfecto contacto entre ambas tuberías.
2. Limpiar con una estopa impregnada de alcohol los extremos de las tuberías, evitando tocar las superficies a ser unidas.
3. Colocar las tuberías con las mordazas apropiadas en el equipo y calentar simultáneamente los extremos de las tuberías con la placa térmica a una temperatura de unos 210 °C, dependiendo del espesor y del diámetro según las recomendaciones del fabricante de la tubería.
4. Las superficies se deben comprimir contra la placa térmica con una fuerza y un tiempo indicado por el fabricante según el diámetro y el espesor de manera que absorban el calor necesario para polifusión.
5. Una vez transcurrido el tiempo de calentamiento de las superficies a unir, se retira la placa térmica lo más rápidamente posible.
6. Sin tocar el material blando se procede inmediatamente a unir los extremos mediante la aplicación de una fuerza según las indicaciones del fabricante la cual se debe mantener hasta que la temperatura sea inferior a los 70 °C, y no se debe acelerar el enfriamiento con la aplicación de agua o corrientes de aire
7. Inspeccionar que en toda la circunferencia, el reborde esté contra el tubo. La unión de la tubería debe permanecer inmóvil durante unos 60 minutos adicionales antes de su movilización y manejo

En las figura 1 – 10, se muestran fotos de la unión de tuberías en la aducción de Río Negro, en el Estado Mérida. (Zona Las Gonzáles)



Fig. 1 – 10 Proceso de unión de tuberías mediante termofusión a tope.

Resistencia a la presión

En un diseño óptimo hay que escoger el espesor de la tubería de tal manera que resista satisfactoriamente las presiones internas, para el caso más desfavorable de trabajo y las presiones externas producidas por el peso del relleno en caso que la tubería se encuentre enterrada en una zanja.

Espesor por presiones internas

Las presiones que se producen en el interior de las tuberías deben ser absorbidas por la propia tubería según se indica en la Fig. 1 - 11.

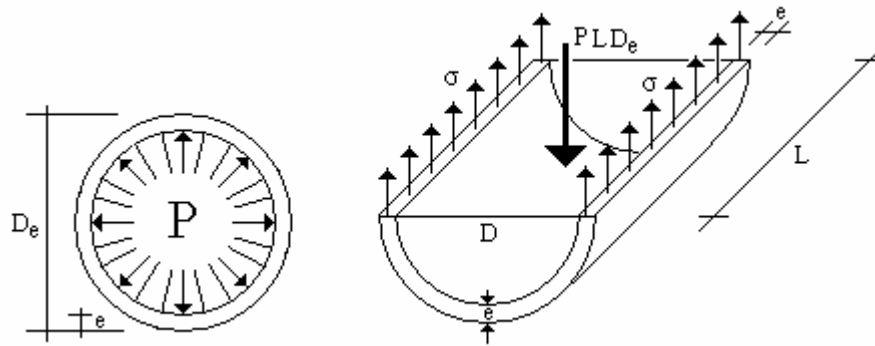


Fig. 1 - 11 Esfuerzos en tuberías por efecto de la presión interna.

Igualando las fuerzas verticales se tiene

$$2 \sigma L e = P L D_e$$

$$e = \frac{P D_e}{2 \sigma} \quad \text{ec. 1. 12}$$

donde:

e es el espesor de la tubería en m.

P es la presión interna en kg/m^2 .

D_e es el diámetro externo de la tubería en m.

σ es el esfuerzo tangencial admisible del material de la tubería en kg/m^2 .

En el caso de tuberías de acero el valor de σ tiene un valor de 4200 kg/cm^2 .

Espesor por presiones externas

El espesor de la tubería debe ser tal que resista adecuadamente las cargas externas que se presentan. Si la tubería está enterrada debe resistir las presiones de la tierra y las cargas de los vehículos y si se coloca superficialmente los posibles impactos y los esfuerzos producidos por cambios de temperatura.

Espesor por colapso de la tubería (presiones internas muy bajas)

Se podría producir cuando se realiza el vaciado de una tubería o cuando la línea piezométrica corta la tubería.

El caso más desfavorable es cuando se tiene en el interior de la tubería el vacío absoluto, en este caso las ecuaciones teóricas indican que el espesor de la tubería debe ser mayor o igual a

$$e \geq \sqrt[3]{\frac{P_0(1-\mu^2)}{2E}} D_1 \quad \text{ec. 1. 13}$$

donde

- e es el espesor de la tubería en m.
P₀ es la presión atmosférica local en kg/m².
E es el módulo de elasticidad del material de la tubería
(para el acero E = 2.1 x 10¹⁰ kg/m²)
D₁ es el diámetro al eje neutro de la tubería, en metros, para tubos delgados casi no hay diferencia entre el diámetro interno y el externo.
μ es la relación de Poisson (para el acero μ = 0.30)

Los diámetros y espesores son muy variados y debe consultarse a los fabricantes sobre catálogos que indiquen las características de las tuberías. En casos muy especiales se puede pedir de mutuo acuerdo con la fábrica una tubería especial si la cantidad así lo justifica.

Se ha realizado un gran esfuerzo por normalizar los tipos de tubería y existen diferentes organismos internacionales entre los que podemos citar: AWWA e ISO pero cada proyectista debe solicitar a las fábricas nacionales las características de resistencia de sus productos; a manera de ejemplo se pueden citar:

Clase	Presión de trabajo (lbs/pulg ²) PSI	Equivalencia en m de agua
100	100	70
150	150	105
200	200	140
250	250	175
300	300	210
350	350	245

Tabla 1 – 1 Clases de tubería en función de la presión.
Norma AWWA (American Water Works Association)

Clase	Metros de agua	Presión de trabajo (lbs/pulg ²) PSI	Atmósfera
5	50	71.5	5
10	100	143.0	10
15	150	214.5	15
20	200	286.0	20
25	250	357.5	25

Tabla 1 – 2 Clases de tubería en función de la presión.
Norma ISO (International Organization for Standarización)

Clase	Presión de trabajo (kg/cm ²)	Equivalencia en m de agua
AA	6	60
AB	10	100
AC	16	160
AD	25	250

Tabla 1 -3 Clases de tubería en función de la presión.
PVC (TUBENPLAST)

Clase	Presión de trabajo (lbs/pulg ²) PSI	Equivalencia en m de agua
N2	45	31.68
N3	60	42.18
N4	90	63.28
N5	150	105.46

Tabla 1 – 4 Clases de tubería en función de la presión.
PEAD Norma COVENIN

Topografía

Una vez tomada la decisión del trazado definitivo de la tubería se procede a realizar un levantamiento topográfico detallado, donde se incluyan aquellas áreas de posible expansión de la comunidad. Este levantamiento se referirá a las coordenadas U.T.M según lo exigido por la Cartografía Nacional y al Sistema Altimétrico de Triangulación; en consecuencia, debe dejarse una referencia topográfica (B:M), enlazándola con la más cercana existente. Los levantamientos topográficos deben ser realizados respetando las tolerancias exigidas por el organismo contratante.

Se recomienda utilizar, si las circunstancias lo permiten, las siguientes escalas:

- Para planos de situación de 1: 2000 a 1:5000.
- Para planta general 1:1000
- Para Planos de perfiles, escala vertical: 1: 100
escala horizontal 1: 1000
- Para planos de detalles 1:10, 1:20, 1:50, 1: 100

Debe realizarse un minucioso levantamiento en los cruces de carreteras, puentes, líneas de alta tensión, elevaciones y depresiones.

Las elevaciones deben ser analizadas con detenimiento de manera que allí no se produzcan presiones negativas cuando el sistema se encuentra en funcionamiento. Igualmente en las depresiones no deben existir presiones exageradas.

El paso de la tubería en la depresión se puede realizar de las siguientes maneras:

1. Pasar la tubería enterrada bajo el cauce, en este caso se deben hacer los estudios necesarios para que las aguas de lluvia o del río no socaven la tubería.
2. Construir una tubería en arco de manera que ella misma sea autoportante y soporte las diferentes carga actuantes, como se muestra en la Fig. 1 – 12.

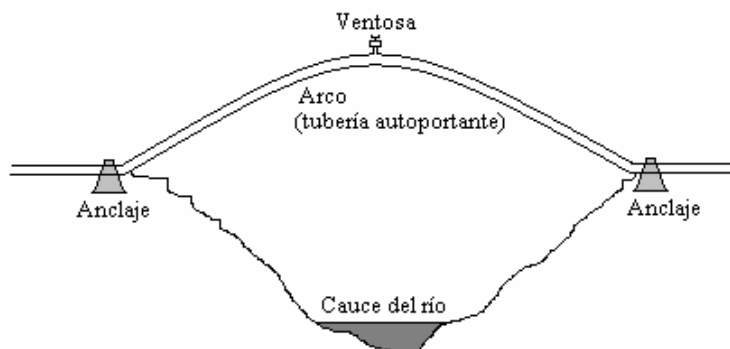


Fig. 1 – 12 Paso de tubería autoportante, por una depresión del terreno.

3. Construir un puente colgante como el mostrado en la Fig. 1 – 13 y la Fig.1-14.

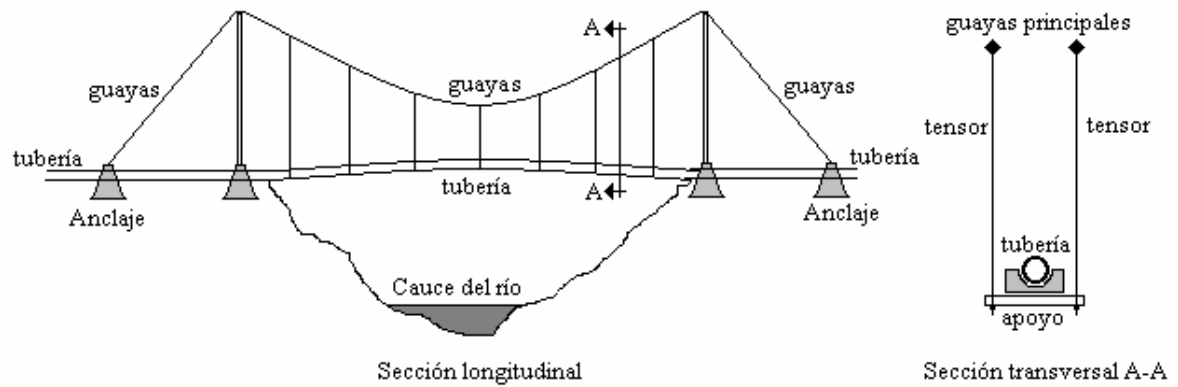


Fig. 1 – 13 Paso de tubería, con puente colgante, por una depresión del terreno.



Tubería colgante.



Torre porta guaya.

Fig. 1 – 14 Paso de tubería, con puente colgante, por una depresión del terreno.
(Mérida, Estado Mérida).

Capítulo 2

Diseño hidráulico

Línea de aducción

Es el conjunto de tanques, tuberías, bomba y demás accesorios que conforman un sistema con el fin de transportar en forma eficientemente y segura el agua desde un punto inicial o lugar de origen hacia un punto final o destino.

Dependiendo de la cota del punto de origen y de la cota del punto de destino pueden encontrarse las siguientes situaciones:

1. Aducción por gravedad.

Se presenta cuando el punto inicial o de origen se encuentra a una cota mayor que la cota del punto final o destino, no existiendo cotas mayores que las del origen entre ambos puntos, en este caso el agua puede circular por gravedad. En la Fig. 2-1 se muestra una aducción por gravedad. Cuando la válvula final se encuentra cerrada el sistema se encuentra en reposo y la velocidad es cero, en este caso la altura de presión el interior de la tubería viene determinada por la diferencia entra la cota de la línea de presión estática, LPE (línea imaginaria hasta donde llegaría el agua si se instalaran piezómetros a lo largo de la tubería cuando el sistema permanece en reposo) y la cota del eje de la tubería (C_1-C_4).

2. Aducción por bombeo.

Se presenta cuando el punto inicial o de origen se encuentra a una cota menor que la cota del punto final o destino, en este caso el agua no posee energía para circular y se hace necesario la adicción de energía mediante una motobomba.

Para el sistema de aducción por bombeo, de diámetro constante, que se muestra en la Fig. 2-2, si la válvula que se encuentran a la salida de la bomba, está cerrada, el sistema está en reposo, la velocidad es cero y se tiene la línea de presión estática (LPE). En este caso la altura de presión en el interior de la tubería viene determinada por la diferencia entra la cota de la línea de presión estática (LPE) y la cota del eje de la tubería.

3. Aducción mixta.

Cuando el agua es bombeada a depósitos intermedios, ubicados a una cota superior del origen y luego el agua circula por gravedad hasta un depósito de cota inferior, es una combinación de los dos casos anteriores.

Líneas presión estática, presión dinámica, sobre presión y de energía para un sistema por gravedad.

Cuando se abre la válvula V, el agua circula por la tubería la línea imaginaria de presión estática ya no existe, y en su lugar aparece la línea de presión dinámica (línea imaginaria hasta donde llegaría el agua si se instalaran piezómetros a lo largo de la tubería cuando el agua circula en el sistema), en esta línea se observa en las Fig. 2-1 y 2-2 que la cota de la línea piezométrica disminuye hacia aguas abajo (lugar hacia donde fluye el agua), efecto producido por el roce existente entre el agua y la tubería.

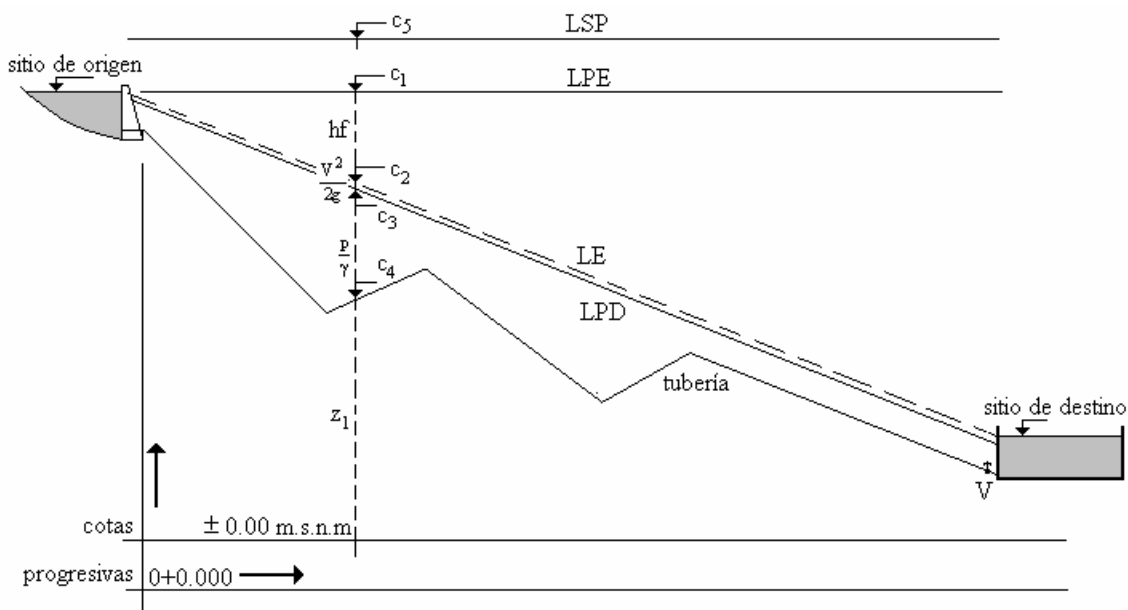


Fig. 2-1 Esquema de instalación en aducción por gravedad.

La línea imaginaria de energía (LE), se encuentra ubicada, sobre la línea piezométrica, una distancia igual a la energía cinética, $\frac{V^2}{2g}$, si este término es pequeño se puede despreciar y considerarlas como una sola.

La distancia, z_1 , representa la posición de la tubería expresada en metros y es igual a C_4 .

La distancia, $\frac{p}{\gamma}$, representa la altura de presión o presión expresada en metros de agua y es igual a $C_3 - C_4$.

La distancia, $\frac{V^2}{2g}$, representa la energía cinética en metros y es igual a $C_2 - C_3$.

La distancia, h_f , representa la pérdida de energía por fricción, expresada en metros y es igual a $C_1 - C_2$.

En el momento en que la válvula se está cerrando aparece un aumento temporal de la presión conocido como Golpe de Ariete, el cual es igual a $C_5 - C_1$ y será analizado posteriormente.

Las cotas del sistema de tuberías, están referidas, generalmente al nivel del mar y las distancias horizontales al inicio de la tubería u obra de toma.

Líneas presión estática, presión dinámica, sobre presión y de energía para un sistema por bombeo.

Para el sistema de aducción por bombeo, de diámetro constante, que se muestra en el esquema, si las válvulas que se encuentran a la salida de la bomba, están cerradas, el sistema está en reposo, la velocidad es cero y se tiene la línea imaginaria de presión estática (LPE) indicada en la Fig. 2-2.

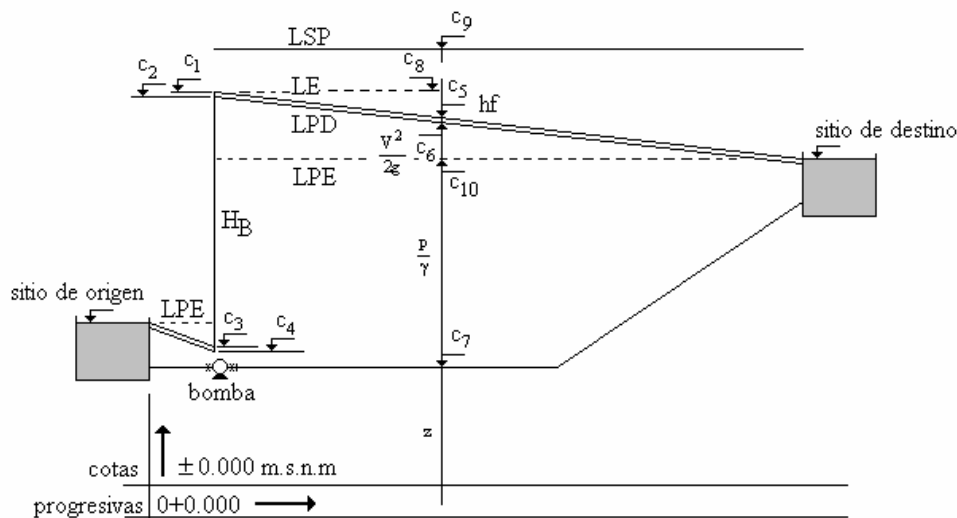


Fig. 2-2 Esquema de instalación en aducción por bombeo.

Al poner en funcionamiento el equipo de bombeo y abrir la válvula, el agua comienza a circular, la línea (imaginaria) de presión estática desaparece y aparecen las líneas de presión dinámica (LPD) y la de energía (LE), las cuales si la energía cinética $\frac{V^2}{2g}$ es pequeña, se puede despreciar y considerarlas como una sola.

Al igual que el caso anterior las líneas de presión dinámica y energía disminuyen de cota a medida que el agua circula desde aguas arriba (origen de agua), hacia aguas abajo (destino del agua), debido a los efectos de fricción que existe entre el contorno interno de la tubería y el agua; es decir, el roce o pérdida por fricción.

La distancia, z_1 , representa la posición de la tubería expresada en metros y es igual a C_7 .

La distancia $\frac{p}{\gamma}$ representa la altura de presión o presión expresada en metros de agua y es igual a $C_6 - C_7$.

La distancia $\frac{V^2}{2g}$ representa la energía cinética en metros y es igual a $C_5 - C_6$.

La distancia h_f representa la pérdida de energía por fricción expresada en metros y es igual a $C_8 - C_5$.

La distancia, H_B , representa la energía suministrada por la bomba expresada en metros y es igual a $C_1 - C_3$.

La distancia $C_3 - C_7$, representa la altura de presión en la entrada de la bomba.

La distancia $C_2 - C_7$, representa la altura de presión en la salida de la bomba.

La distancia $C_9 - C_{10}$, representa la sobre presión, en metros de agua, por efecto de la parada de la bomba.

Pérdidas de energía, en tuberías, por efecto de la fricción:

Al circular el agua en el interior de una tubería se produce un roce entre ambos, el cual se manifiesta como una pérdida de energía, conocida como h_f , según se muestra en la Fig. 2-3.

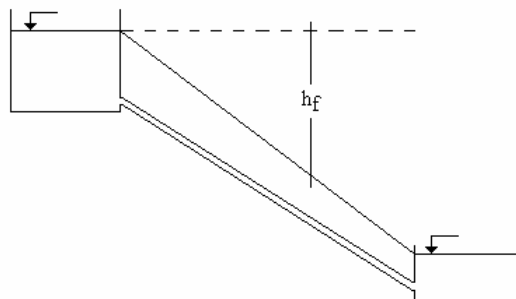


Fig.2-3 Pérdida por fricción en tubería.

Existe una gran cantidad de fórmulas para determinar el valor de la pérdida de energía en tuberías, entre las más conocidas tenemos la de Darcy-Weisbach y la de Hazen- Williams.

Fórmula de Darcy-Weisbach:

En base a una teoría racional de la resistencia hidráulica y basada en contribuciones de otros investigadores Darcy-Weisbach presenta la siguiente expresión para determinar las pérdidas por fricción:

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad \text{ec. 2.1}$$

donde:

h_f pérdida de energía, en m.

f es el coeficiente de fricción, adimensional, el cual puede ser determinado mediante la utilización del diagrama de Moody mostrado en la Fig. 2-4

L La longitud real del tramo de tubería considerado, en m.

D Diámetro interno de la tubería, en m.

V Velocidad media del agua en m/s.

g aceleración de la gravedad, en m/s^2 .

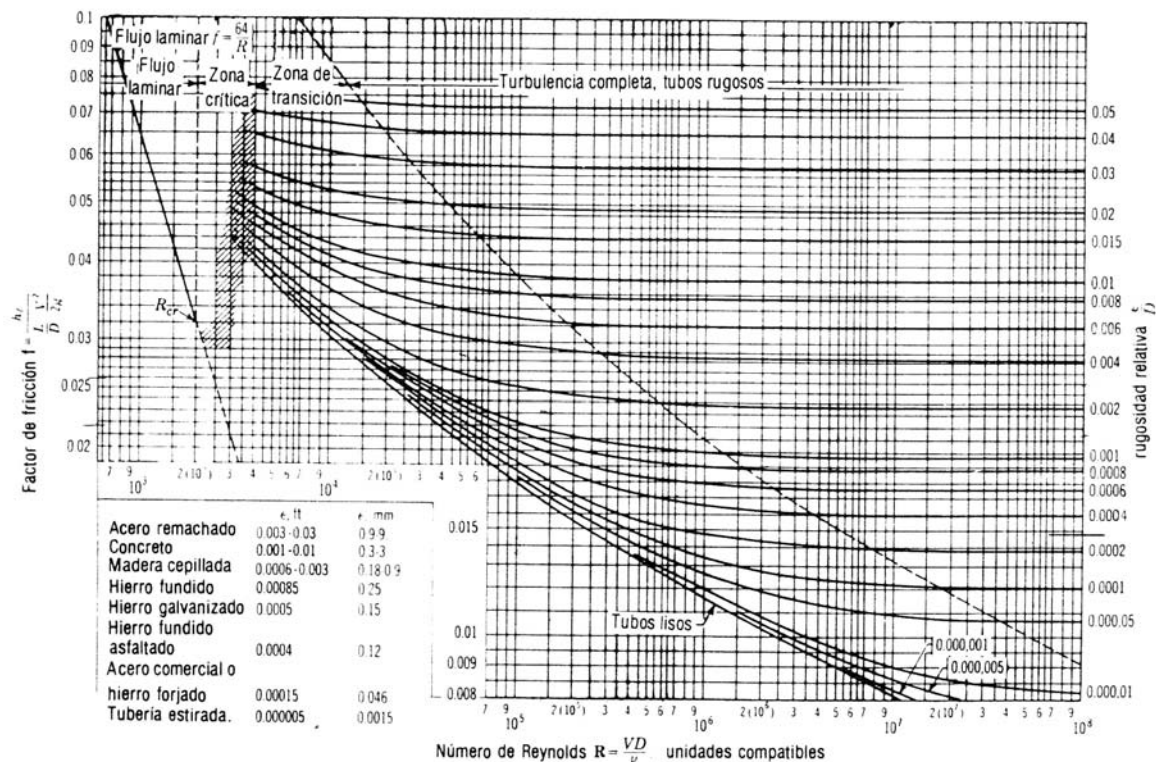


Fig. 2-4 Diagrama de Moody

En la escala vertical derecha se encuentra la relación adimensional ϵ/D que representa la rugosidad relativa de la tubería, los valores de ϵ se encuentran tabulados en el diagrama de Moody.

En la escala horizontal se encuentran los valores del número adimensional de Reynolds y en la escala vertical derecha se encuentran los valores del coeficiente de fricción f .

En sistemas de abastecimiento de agua, el flujo que se produce generalmente posee una turbulencia completa, además con los diámetros usuales, las velocidades permisibles y la viscosidad cinemática del agua difícilmente se podría producir flujo laminar, por lo que generalmente el coeficiente de fricción es independiente del número de Reynolds y solamente depende de la rugosidad relativa ϵ/D .

Fórmula de Hazen-Williams:

La fórmula de Hazen-Williams, es una de las ecuaciones empíricas más usadas a nivel de diseño de acueductos, la cual se expresa como

$$V = C R_H^{0.63} S^{0.54} 0.001^{-0.04}$$

ec.2.2

al simplificar

$$V = 1.3182567 C R_H^{0.63} S^{0.54}$$

ec.2.3

donde:

V es la velocidad media del agua expresada en pie/s.

C es el coeficiente de Hazen-Williams el cual es dimensional y está expresado en $\text{pie}^{0.37}/\text{s}$ y se encuentra tabulado.

Como el valor de C es un coeficiente dimensional, y es necesario para obtener las dimensiones correctas de la velocidad. Por eso para el uso de los valores de C propuestos en la literatura, el coeficiente de la ecuación de Hazen-Williams es diferente dependiendo del sistema de unidades utilizado.

R_H es el radio hidráulico expresado en pies, el cual se define como la relación entre el área transversal A y el perímetro mojado P , así,

$$R_H = \frac{A}{P} = \frac{\frac{\pi}{4} D^2}{\pi D} = \frac{D}{4} \quad \text{ec. 2.4}$$

S es la pendiente de la línea de energía, adimensional, la cual se puede expresar como:

$$S = \frac{h_f}{L} \quad \text{ec. 2.5}$$

donde

h_f es la pérdida de energía, por fricción en pies.

L es la longitud real, del tramo de tubería considerado en pies.

El caudal se expresa como:

$$Q = V A = 1.3182567 C R_H^{0.54} S^{0.54} \frac{\pi}{4} D^2 \quad \text{ec.2.6}$$

$$Q = 1.0353563 C R_H^{0.63} S^{0.54} D^2 \quad \text{ec.2.7}$$

Al sustituir las expresiones de R_H y S se obtiene:

$$Q = 1.0353563 C \left(\frac{D}{4} \right)^{0.63} \left(\frac{h_f}{L} \right)^{0.54} D^2 \quad \text{ec. 2.8}$$

Al despejar y simplificar se obtiene

$$h_f = \frac{4.7256243}{C^{1.8518518} D^{4.87037}} L Q^{1.8518518} \quad \text{ec.2.9}$$

donde

h_f en pie, L en pies, Q en pie³/s y D en pies

si definimos α_1 como

$$\alpha_1 = \frac{1742.2015}{C^{1.8518518} D^{4.87037}} \quad \text{ec. 2.10}$$

se obtiene

$$h_f = \alpha_1 L Q^{1.85} \quad \text{ec. 2.11}$$

Si queremos expresar

h_f en m, L en m, Q en l/s y D en pulgadas se tiene:

$$\frac{h_f}{0.3048} = \frac{4.7256243}{C^{1.8518518} \left(\frac{D}{12} \right)^{4.87037}} \frac{L}{0.3048} \left(\frac{Q}{28.3169} \right)^{1.8518518} \quad \text{ec. 2.12}$$

$$h_f = \frac{(0.3048) 4.7256243}{C^{1.8518518} \left(\frac{D}{12} \right)^{4.87037} 0.3048 (28.3169)^{1.8518518}} L (Q)^{1.8518518} \quad \text{ec. 2.13}$$

$$h_f = \frac{1742.2015}{C^{1.8518518} D^{4.87037}} L (Q)^{1.8518518} \quad \text{ec.2.14}$$

si definimos α_2 como

$$\alpha_2 = \frac{1742.2015}{C^{1.8518518} D^{4.87037}} \quad \text{ec. 2.15}$$

se obtiene

$$h_f = \alpha_2 L Q^{1.85} \quad \text{ec. 2.16}$$

si queremos expresar

h_f en m, L en m, Q en l/s y D en mm se tiene:

$$\frac{h_f}{0.3048} = \frac{4.7256243}{C^{1.8518518} \left(\frac{D}{0.3048 \times 1000} \right)^{4.87037}} \frac{L}{0.3048} \left(\frac{Q}{28.3169} \right)^{1.8518518} \quad \text{ec.2.17}$$

$$h_f = \frac{(0.3048) 4.7256243}{C^{1.8518518} \left(\frac{D}{0.3048 \times 1000} \right)^{4.87037} 0.3048 (28.3169)^{1.8518518}} L (Q)^{1.8518518} \quad \text{ec. 2.18}$$

$$h_f = \frac{1.209591 \times 10^{10}}{C^{1.8518518} D^{4.87}} L Q^{1.85} \quad \text{ec. 2.19}$$

si definimos α_2 como

$$\alpha_3 = \frac{1.209591 \times 10^{10}}{C^{1.8518518} D^{4.87037}} \quad \text{ec. 2.20}$$

se obtiene

$$h_f = \alpha_3 L Q^{1.85} \quad \text{ec. 2.21}$$

El Coeficiente de Hazen-Williams

De la ecuación de Hazen-Williams se observa que a medida que C aumenta, la capacidad hidráulica aumenta. A medida que la tubería envejece C disminuye. La experiencia demuestra que para un mismo material C aumenta ligeramente con el diámetro y disminuye ligeramente con la velocidad, según lo muestra Lamont en la siguiente tabla 2-1.

Clase de Tubería	Valores de C en tuberías nuevas			
	V \approx 0.90 m/s		1.80 m/s \leq V \leq 3.60 m/s	
	$\phi \leq 12''$	$\phi > 12''$	$\phi \leq 12''$	$\phi > 12''$
HF sin revestimiento interno	125	130	121	126
HF con revestimiento interno	135	140	133	138
HG	120	—	116	—
A sin revestimiento interno	140	145	138	145
A con revestimiento interno	145 – 150	150	145 – 150	150
AC	145 – 150	150	145 – 150	150
PVC	135 – 150	150	145 – 150	150

Tabla 2-1 Valores del coeficiente C, según Lamont.

Generalmente para tuberías de pequeño diámetro y cierto número de año de servicio Simón Arocha muestra la tabla 2-2.

Clase de Tubería	Valores de C
HF	100
HFD	100
Tubería con revestimiento interno de concreto	110
A	120
ACP	120
PVC	140
HG	100 – 110

Tabla 2-2 Valores del coeficiente C, según Simón Arocha.

Con el fin de facilitar los cálculos el Dr. Rafael León estableció una relación entre los coeficientes α al transformar la ecuación $h_f = \alpha L Q^{1.85}$ en $h_f = \alpha L Q^2$, los cuales se encuentran en las tablas 2-3, 2-4, 2-5 y 2-6.

Efectos de las pérdidas menores o concentradas:

Las pérdidas menores se expresan como

$$h_m = k \frac{V^2}{2g} = k \frac{Q^2}{A^2 2g} = k_1 Q^2 \quad \text{ec. 2.22}$$

Los valores de k para cada accesorio son suministrados por el fabricante o por manuales especializados, indicando detalladamente las características del accesorio y en el caso de válvulas o compuertas se debe suministrar la relación existente entre el coeficiente k y el grado de abertura.

Es una práctica, es muy usual, sustituir todas las pérdidas menores o concentradas por una longitud equivalente que produzca el mismo efecto que éstas, generalmente se considera que esta longitud se puede representar satisfactoriamente por un 10% de la longitud real de la tubería, es decir:

$$L = L_r + 0.10 L_r = 1.10 L_r \quad \text{ec. 2.23}$$

ϕ mm	C = 50	C = 60	C = 70	C = 80	C = 90	C = 100	C = 110	C = 120	C = 125	C = 130	C = 135	C = 140
80	0.24577	0.23352	0.22520	0.21962	0.21576	0.21299	0.21087	0.39263	0.38600	0.38003	0.37443	0.36977
100	0.21579	0.21132	0.38510	0.36624	0.35321	0.34387	0.33672	0.33128	0.32904	0.32702	0.32513	0.32356
125	0.35333	0.33822	0.32874	0.32237	0.31797	0.31481	0.31240	0.31056	0.49806	0.49125	0.48488	0.47954
150	0.32199	0.31576	0.31185	0.49223	0.47409	0.46108	0.45112	0.44355	0.44043	0.43762	0.43500	0.43280
175	0.31037	0.47435	0.45590	0.44351	0.43496	0.42882	0.42412	0.42055	0.41907	0.41775	0.41651	0.41547
200	0.45418	0.43883	0.42920	0.42272	0.41825	0.41505	0.41260	0.41073	0.59962	0.59270	0.58623	0.58081
250	0.41829	0.41311	0.59858	0.57673	0.56164	0.55081	0.54253	0.53623	0.53364	0.53130	0.52911	0.52729
300	0.57534	0.55399	0.54060	0.53160	0.52538	0.52093	0.51752	0.51492	0.51385	0.51289	0.51199	0.51124
350	0.53559	0.52550	0.51918	0.51493	0.51199	0.69885	0.68274	0.67048	0.66544	0.66089	0.65664	0.65308
400	0.51858	0.51332	0.51001	0.67795	0.66262	0.65162	0.64321	0.63681	0.63417	0.63180	0.62958	0.62772
450	0.51048	0.67509	0.65646	0.64395	0.63530	0.62910	0.62436	0.62075	0.61927	0.61793	0.61668	0.61563
500	0.6185	0.64432	0.63333	0.62594	0.62084	0.61718	0.61438	0.61225	0.61137	0.61058	0.60984	0.609226
550	0.63947	0.62828	0.62127	0.61655	0.61330	0.61096	0.79176	0.77817	0.77257	0.76753	0.76282	0.75887
600	0.62584	0.61852	0.61393	0.61084	0.78708	0.77179	0.76009	0.75119	0.74753	0.74422	0.74114	0.73855
650	0.61751	0.61255	0.79435	0.77344	0.75899	0.74863	0.74071	0.73468	0.73219	0.72996	0.72788	0.72612
700	0.61221	0.78749	0.76579	0.75120	0.74113	0.73391	0.72838	0.72418	0.72245	0.72089	0.71943	0.71821
750	0.78727	0.76254	0.74703	0.73660	0.72941	0.72424	0.72029	0.71728	0.71605	0.71423	0.71389	0.71302
800	0.76375	0.74569	0.73435	0.72674	0.72148	0.71771	0.71482	0.71263	0.71172	0.71091	0.71015	0.89509

Tabla 2-3 Valores del coeficiente α para la ecuación $h_f = \alpha L Q^{1.85}$.

ϕ in	C = 50	C = 60	C = 70	C = 80	C = 90	C = 100	C = 110	C = 120	C = 125	C = 130	C = 135	C = 140
2	0.1)4280	0.1)3068	0.1)2307	0.1)1795	0.1)1442	0.1)1189	0.2)9952	0.2)8477	0.2)7871	0.2)7324	0.2)6813	0.2)6385
2.5	0.1)1445	0.1)1036	0.2)7787	0.2)6061	0.2)4869	0.2)4014	0.2)3360	0.2)2862	0.2)2657	0.2)2473	0.2)2300	0.2)2155
3	0.2)5951	0.2)4265	0.2)3207	0.2)2496	0.2)2005	0.2)1653	0.2)1383	0.2)1178	0.2)1094	0.2)1018	0.3)9472	0.3)8877
4	0.2)1468	0.2)1052	0.3)7911	0.3)6158	0.3)4947	0.3)4078	0.3)3413	0.3)2908	0.3)2700	0.3)2512	0.3)2337	0.3)2190
5	0.3)4957	0.3)3553	0.3)2671	0.3)2079	0.3)1670	0.3)1377	0.3)1152	0.4)9818	0.4)9116	0.4)8482	0.4)7890	0.4)7394
6	0.3)2041	0.3)1463	0.3)1100	0.4)8563	0.4)6879	0.4)5671	0.4)4747	0.4)4043	0.4)3754	0.4)3493	0.4)3249	0.4)3045
8	0.4)5036	0.4)3609	0.4)2714	0.4)2112	0.4)1697	0.4)1390	0.4)1171	0.5)9975	0.5)9261	0.5)8618	0.5)8016	0.5)7513
10	0.4)1700	0.4)1218	0.5)9183	0.5)7132	0.5)5729	0.5)4723	0.5)3953	0.5)3367	0.5)3127	0.5)2909	0.5)2706	0.5)2536
12	0.5)7002	0.5)5018	0.5)3773	0.5)2937	0.5)2359	0.5)1945	0.5)1628	0.5)1387	0.5)1287	0.5)1198	0.5)1114	0.5)1044
14	0.5)3308	0.5)2370	0.5)1782	0.5)1387	0.5)1114	0.6)9188	0.6)7690	0.6)6551	0.6)6082	0.6)5660	0.6)5265	0.6)4934
16	0.5)1727	0.5)1238	0.6)9308	0.6)7245	0.6)5820	0.6)4798	0.6)4016	0.6)3421	0.6)3176	0.6)2955	0.6)2749	0.6)2576
18	0.6)9738	0.6)6979	0.6)5248	0.6)4085	0.6)3281	0.6)2705	0.6)2264	0.6)1929	0.6)1791	0.6)1666	0.6)1550	0.6)1453
20	0.6)5832	0.6)4180	0.6)3143	0.6)2446	0.6)1965	0.6)1620	0.6)1356	0.6)1155	0.6)1072	0.7)9979	0.7)9283	0.7)8699
24	0.6)2402	0.6)1722	0.6)1294	0.6)1008	0.7)8094	0.7)6673	0.7)5585	0.7)4758	0.7)4417	0.7)4110	0.7)3824	0.7)3583
30	0.7)8111	0.7)5813	0.7)4371	0.7)3402	0.7)2733	0.7)2253	0.7)1886	0.7)1606	0.7)1491	0.7)1388	0.7)1291	0.7)1210
36	0.7)3341	0.7)2394	0.7)1800	0.7)1401	0.7)1126	0.8)9280	0.8)7767	0.8)6617	0.8)6143	0.8)5716	0.8)5317	0.8)4983
42	0.7)1578	0.7)1131	0.8)8503	0.8)6618	0.8)5317	0.8)4383	0.8)3668	0.8)3125	0.8)2901	0.8)2700	0.8)2511	0.8)2354
48	0.8)8240	0.8)5906	0.8)4441	0.8)3456	0.8)2776	0.8)2289	0.8)1916	0.8)1632	0.8)1515	0.8)1410	0.8)1311	0.8)1229

Tabla 2-4 Valores del coeficiente α para la ecuación $h_f = \alpha L Q^{1.85}$.

ϕ mm	C = 50	C = 60	C = 70	C = 80	C = 90	C = 100	C = 110	C = 120	C = 125	C = 130	C = 135	C = 140
80	0.(2)3798	0.(2)2722	0.(2)2046	0.(2)1593	0.(2)1280	0.(2)1055	0.(3) 883	0.(3)7522	0.(3)6984	0.(3)6499	0.(3)6045	0.(3)3665
100	0.(2)1295	0.(3)9280	0.(3)6978	0.(3)5431	0.(3)4363	0.(3)3597	0.(3)3011	0.(3)2565	0.(3)2381	0.(3)2210	0.(3)2061	0.(3)1932
125	0.(3)3769	0.(3)2701	0.(3)2031	0.(3)1581	0.(3)1270	0.(3)1047	0.(4)8763	0.(4)7465	0.(4)6931	0.(4)6450	0.(4)6000	0.(4)5622
150	0.(3)1464	0.(3)1050	0.(4)7892	0.(4)6143	0.(4)4934	0.(4)4068	0.(4)3405	0.(4)2900	0.(4)2693	0.(4)2506	0.(4)2331	0.(4)2185
175	0.(4)6617	0.(4)4742	0.(4)3566	0.(4)2775	0.(4)2229	0.(4)1838	0.(4)1538	0.(4)1310	0.(4)1217	0.(4)1132	0.(4)1053	0.(5)9870
200	0.(4)3251	0.(4)2330	0.(4)1752	0.(4)1364	0.(4)1095	0.(5)9030	0.(5)7558	0.(5)6438	0.(5)5978	0.(5)5562	0.(5)5174	0.(5)4849
250	0.(4)1017	0.(5)7289	0.(5)5481	0.(5)4226	0.(5)3427	0.(5)2825	0.(5)2365	0.(5)2014	0.(5)1870	0.(5)1740	0.(5)1619	0.(5)1517
300	0.(5)3982	0.(5)2853	0.(5)2146	0.(5)1670	0.(5)1342	0.(5)1106	0.(6)9257	0.(6)7886	0.(6)7322	0.(6)6813	0.(6)6339	0.(6)5939
350	0.(5)1779	0.(5)1275	0.(6)9587	0.(6)7462	0.(6)5995	0.(6)4942	0.(6)4136	0.(6)3524	0.(6)3272	0.(6)3044	0.(6)2832	0.(6)2654
400	0.(6)8827	0.(6)6326	0.(6)4757	0.(6)3703	0.(6)2974	0.(6)2552	0.(6)2052	0.(6)1748	0.(6)1623	0.(6)1510	0.(6)1405	0.(6)1317
450	0.(6)4846	0.(6)3473	0.(6)2611	0.(6)2032	0.(6)1633	0.(6)1346	0.(6)1127	0.(7)9597	0.(7)8911	0.(7)8291	0.(7)7713	0.(7)7228
500	0.(6)2727	0.(6)1955	0.(6)1470	0.(6)1144	0.(7)9190	0.(7)7576	0.(7)6341	0.(7)5402	0.(7)5015	0.(7)4667	0.(7)4341	0.(7)4068
550	0.(6)1539	0.(6)1103	0.(7)8295	0.(7)6457	0.(7)5187	0.(7)4276	0.(7)3579	0.(7)3049	0.(7)2831	0.(7)2634	0.(7)2450	0.(7)2296
600	0.(6)1050	0.(7)7523	0.(7)5657	0.(7)4403	0.(7)3537	0.(7)2916	0.(7)2441	0.(7)2079	0.(7)1930	0.(7)1796	0.(7)1671	0.(7)1566
650	0.(7)6862	0.(7)4917	0.(7)3698	0.(7)2878	0.(7)2312	0.(7)1906	0.(7)1595	0.(7)1359	0.(7)1262	0.(7)1174	0.(7)1092	0.(7)1024
700	0.(7)4680	0.(7)3354	0.(7)2522	0.(7)1963	0.(7)1577	0.(7)1300	0.(7)1088	0.(8)9269	0.(8)8606	0.(8)8008	0.(8)7448	0.(8)6981
750	0.(7)3290	0.(7)2358	0.(7)1773	0.(7)1380	0.(7)1109	0.(8)9140	0.(8)7650	0.(8)6517	0.(8)6051	0.(8)5630	0.(8)5237	0.(8)4908
800	0.(7)2372	0.(7)1700	0.(7)1278	0.(8)9948	0.(8)7991	0.(8)6588	0.(8)5514	0.(8)4697	0.(8)4361	0.(8)4058	0.(8)3775	0.(8)3538

Tabla 2-5 Valores del coeficiente α para la ecuación $h_f = \alpha L Q^2$.

ϕ in	C = 50	C = 60	C = 70	C = 80	C = 90	C = 100	C = 110	C = 120	C = 125	C = 130	C = 135	C = 140
2	0.1)4169	0.1)2988	0.1)2247	0.1)1749	0.1)1406	0.1)1158	0.2)9692	0.2)8257	0.2)7666	0.2)7133	0.2)6635	0.2)6218
2.5	0.1)1300	0.2)9319	0.2)7007	0.2)5454	0.2)4381	0.2)3612	0.2)3023	0.2)2575	0.2)2391	0.2)2225	0.2)2070	0.2)1940
3	0.2)4838	0.2)3468	0.2)2607	0.2)2029	0.2)1630	0.2)1344	0.2)1125	0.3)9583	0.3)8897	0.3)8279	0.3)7701	0.3)7217
4	0.2)1099	0.3)7879	0.3)5925	0.3)4612	0.3)3705	0.3)3054	0.3)2556	0.3)2178	0.3)2022	0.3)1881	0.3)1750	0.3)1640
5	0.3)3519	0.3)2522	0.3)1897	0.3)1476	0.3)1186	0.4)9776	0.4)8183	0.4)6970	0.4)6472	0.4)6022	0.4)5602	0.4)5250
6	0.3)1362	0.4)9758	0.4)7337	0.4)5711	0.4)4588	0.4)3782	0.4)3166	0.4)2697	0.4)2504	0.4)2330	0.4)2167	0.4)2031
8	0.4)3077	0.4)2205	0.4)1658	0.4)1291	0.4)1037	0.5)8547	0.5)7154	0.5)6094	0.5)5658	0.5)5265	0.5)4897	0.5)4590
10	0.5)9522	0.5)6824	0.5)5131	0.5)3994	0.5)3208	0.5)2645	0.5)2214	0.5)1886	0.5)1751	0.5)1629	0.5)1516	0.5)1420
12	0.5)3661	0.5)2624	0.5)1973	0.5)1536	0.5)1234	0.5)1017	0.6)8512	0.6)7251	0.6)6733	0.6)6265	0.6)5827	0.6)5461
14	0.5)1654	0.5)1185	0.6)8912	0.6)6937	0.6)5373	0.6)4594	0.6)3845	0.6)3276	0.6)3041	0.6)2830	0.6)2632	0.6)2467
16	0.6)8086	0.6)5795	0.6)4357	0.6)3391	0.6)2724	0.6)2246	0.6)1880	0.6)1601	0.6)1487	0.6)1384	0.6)1287	0.6)1206
18	0.6)4414	0.6)3163	0.6)2378	0.6)1851	0.6)1487	0.6)1226	0.6)1026	0.7)8741	0.7)8116	0.7)7552	0.7)7025	0.7)6584
20	0.6)2532	0.6)1814	0.6)1364	0.6)1062	0.6)8530	0.7)7032	0.7)5886	0.7)5014	0.7)4655	0.7)4332	0.7)4029	0.7)3776
24	0.7)9634	0.7)6904	0.7)5191	0.7)4041	0.7)3246	0.7)2676	0.7)2240	0.7)1908	0.7)1772	0.7)1648	0.7)1533	0.7)1437
30	0.7)3018	0.7)2163	0.7)1626	0.7)1266	0.7)1017	0.8)8382	0.8)7016	0.8)5976	0.8)5549	0.8)5163	0.8)4803	0.8)4501
36	0.7)1166	0.8)8357	0.8)6284	0.8)4891	0.8)3929	0.8)3239	0.8)2711	0.8)2309	0.8)2144	0.8)1995	0.8)1856	0.8)1739
42	0.8)5285	0.8)3787	0.8)2848	0.8)2217	0.8)1781	0.8)1468	0.8)1229	0.8)1047	0.9)9718	0.9)9043	0.9)8412	0.9)7883
48	0.8)2563	0.8)1837	0.8)1381	0.8)1075	0.9)8635	0.9)7119	0.9)5959	0.9)5076	0.9)4713	0.9)4385	0.9)4079	0.9)3823

Tabla 2-6 Valores del coeficiente α para la ecuación $h_f = \alpha L Q^2$.

Golpe de ariete

Es el fenómeno que se presenta debido a una perturbación en un sistema de tubería, como por ejemplo, el cierre de una válvula o la parada de una equipo de bombeo, en este momento y en forma transitoria se produce bruscamente un aumento de presión que viaja en el interior de la tubería el cual desaparece por efecto de la fricción.

Para analizar este fenómeno consideremos el sistema representado en la Fig. 2-5, en el cual se encuentra instalada una válvula al final de la tubería y una serie de manómetros a lo largo de la tubería.

Cuando la válvula se encuentra cerrada se tiene la línea imaginaria de presión estática (LDE), cuando la válvula se encuentra abierta desaparece la línea descrita anteriormente y en su lugar aparece la línea imaginaria de presión dinámica (LPD) y en el momento que se está cerrando la válvula aparece temporalmente la línea de presión sobre presión (LSP) que tiene un máximo valor de SP por encima de la presión estática y que disminuye en un tiempo relativamente corto hasta alcanzar la línea de presión estática.

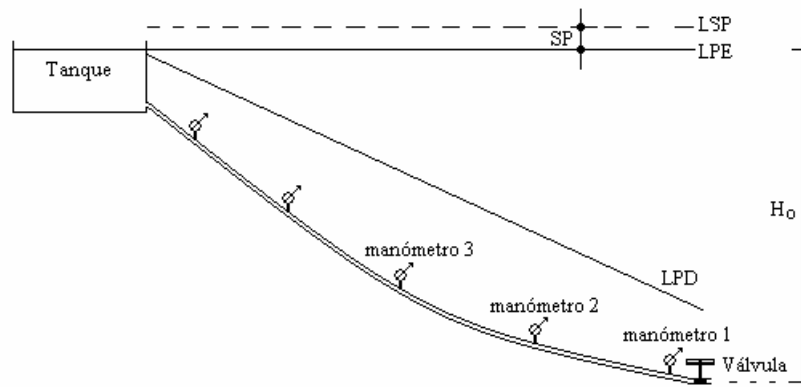


Fig. 2-5 Sistema de tubería con válvula y manómetros.

Al comenzar a cerrar la válvula se produce un aumento de presión, por encima de la presión estática, que viaja, hacia aguas arriba por el interior de la tubería como se evidencia en la lectura de los manómetros 1, 2, 3, etc. Esta onda de presión en un tiempo relativamente corto llega al tanque de alimentación con una presión diferente a la presión estática existente en dicho tanque. Esto origina una nueva onda de presión que viaja hacia aguas abajo hasta llegar a la válvula la cual se puede encontrar parcial o completamente cerrada originándose una nueva onda de presión la cual viajará hacia aguas arriba, este fenómeno se repite, hasta que por efecto de la fricción desaparece, alcanzando, en un cierto tiempo, la presión estática.

Si al llegar la onda de presión a la válvula, esta se encuentra completamente cerrada se considera que el cierre es instantáneo, en caso contrario se considera lento.

La energía cinética que posee el agua, al comenzar a cerrarse la válvula, se transforma una parte en tratar de expandir la tubería y la otra en tratar de comprimir el agua.

El caso sencillo que se analizó anteriormente es solo una de las posibles situaciones que causan el fenómeno de golpe de ariete, entre otras causas se encuentran:

- Arranque o parado de bombas.
- Operación de cualquier tipo de válvulas.
- Llenado de una tubería.
- Vaciado de una tubería.
- Vibraciones de válvulas o bombas.
- Cambios de demandas en la potencia de turbinas.

El efecto del golpe de ariete se podría reducir tomando en consideración lo siguiente:

- Aumentando el tiempo de cerrado de las válvulas; es decir, usando válvulas de cierre lento.
- Usando válvulas de alivio de presión o chimeneas de equilibrio.
- Aumentando el espesor de la tubería; es decir, usando tuberías más resistentes.
- Disminuir la velocidad del agua.

La velocidad de propagación de la onda de presión en el sistema (agua - tubería) se determina, según Arocha, por la expresión:

$$V_w = \frac{1420}{\sqrt{1 + \frac{Kd}{Ee}}} \quad \text{ec.2.24}$$

donde:

V_w	es la velocidad de propagación de la onda de presión en m/s.
K	es módulo volumétrico de elasticidad del agua en kg/m^2 .
e	es el espesor de la pared de la tubería en m.
E	es el módulo de elasticidad del material que esta construida la tubería.
d	es el diámetro exterior de la tubería en m.

El tiempo en el que la onda de presión viaja desde la válvula hasta el tanque y regresa nuevamente a la válvula se define como tiempo crítico, t_c , y se puede determinar por la expresión:

$$t_c = \frac{2 L}{V_w} \quad \text{ec. 2.25}$$

Si el tiempo de cierre de la válvula se designa como t , entonces; si

$$t \leq t_c \quad \text{el cierre es instantáneo}$$

$$t > t_c \quad \text{el cierre es lento}$$

Análisis del fenómeno del golpe de ariete cuando existe un cierre instantáneo de una válvula.

La energía cinética que posee el agua, en el momento del cierre de la válvula, se transforma una parte en expandir la tubería ya que ésta es elástica y la otra parte en comprimir el agua ya que esta posee un módulo de elasticidad volumétrico.

La energía cinética que posee el agua antes del cierre de la válvula es:

$$E_c = \frac{1}{2} m V^2 \quad \text{ec. 2.25}$$

donde

m es la masa de agua existente en la tubería, en UTM/m³.

V es la velocidad media del agua antes del cierre de la válvula, en m/s.

Al sustituir la masa de agua en el interior de la tubería en función de la densidad del agua ρ , la longitud real de la tubería L , y el área A se tiene:

$$E_c = \frac{1}{2} \rho A L V^2 = \frac{1}{2} \frac{\gamma}{g} A L V^2 \quad \text{ec. 2.26}$$

donde

γ es el peso específico del agua en kg/m^3 .
 g es la aceleración de la gravedad en m/s^2 .

Las ecuaciones de elasticidad expresan que esas energías corresponden a:

Energía necesaria para comprimir el agua:

$$E_1 = \frac{\Delta P^2 A L}{2K} \quad \text{ec. 2.27}$$

Energía necesaria para expandir la tubería:

$$E_2 = \frac{\Delta P^2 A L}{2eE} \quad \text{ec. 2.28}$$

donde:

ΔP Es la sobre presión, por encima de la presión estática, que se produce por el cierre de la válvula en kg/m^2 .
 L Es la longitud real de la tubería en m.
 A Es el área interna de la sección transversal de la tubería en m^2 .

Al igualar las ecuaciones anteriores se tiene:

$$E_c = E_1 + E_2$$
$$\frac{1}{2} \frac{\gamma}{g} A L V^2 = \frac{\Delta P^2 A L}{2K} + \frac{\Delta P^2 A L}{2eE} \quad \text{ec. 2.29}$$

de donde, al despejar ΔP se obtiene:

$$\Delta P = V \sqrt{\frac{\gamma}{g} \frac{K e E}{E e + K d}} \quad \text{ec. 2.30}$$

El valor de la sobre presión expresada en metros de agua es

$$SP = \frac{\Delta P}{\gamma}$$

e c. 2.31

En la tabla 2.7 se muestran algunos valores del módulo de elasticidad de algunos materiales utilizados para la construcción de tuberías.

Material	Módulo de elasticidad (kg/m²)
Asbesto cemento	2.4 x 10 ⁹
Bronce	9.6 x 10 ⁹
Hierro fundido	6.0 x 10 ⁹
Concreto armado	3.5 x 10 ⁹
Cobre	1.3 x 10 ¹⁰
Plomo	1.1 x 10 ⁹
Acero	2.1 x 10 ¹⁰
Polietileno de alta densidad	8.2 x 10 ⁷
Policloruro de vinilo	2.6 x 10 ⁸

Tabla 2.7 Modulo de elasticidad de algunos materiales.

En la tabla 2.8 se muestran valores del módulo de elasticidad volumétrico del agua en función de la temperatura.

Temperatura (°C)	Módulo de elasticidad (kg/m²)
0	2.08 x 10 ⁸
5	2.10 x 10 ⁸
10	2.15 x 10 ⁸
15	2.18 x 10 ⁸
20	2.24 x 10 ⁸
25	2.26 x 10 ⁸
30	2.27 x 10 ⁸
35	2.28 x 10 ⁸

Tabla 2.7 Modulo de elasticidad volumétrico del agua..

Análisis del fenómeno del golpe de ariete cuando existe un cierre lento de una válvula.

En el caso de cierre lento, la sobre presión es menor que el caso anterior, para esto existe un método práctico presentado por Allievi, mediante una solución gráfica usando la Fig. 2-6

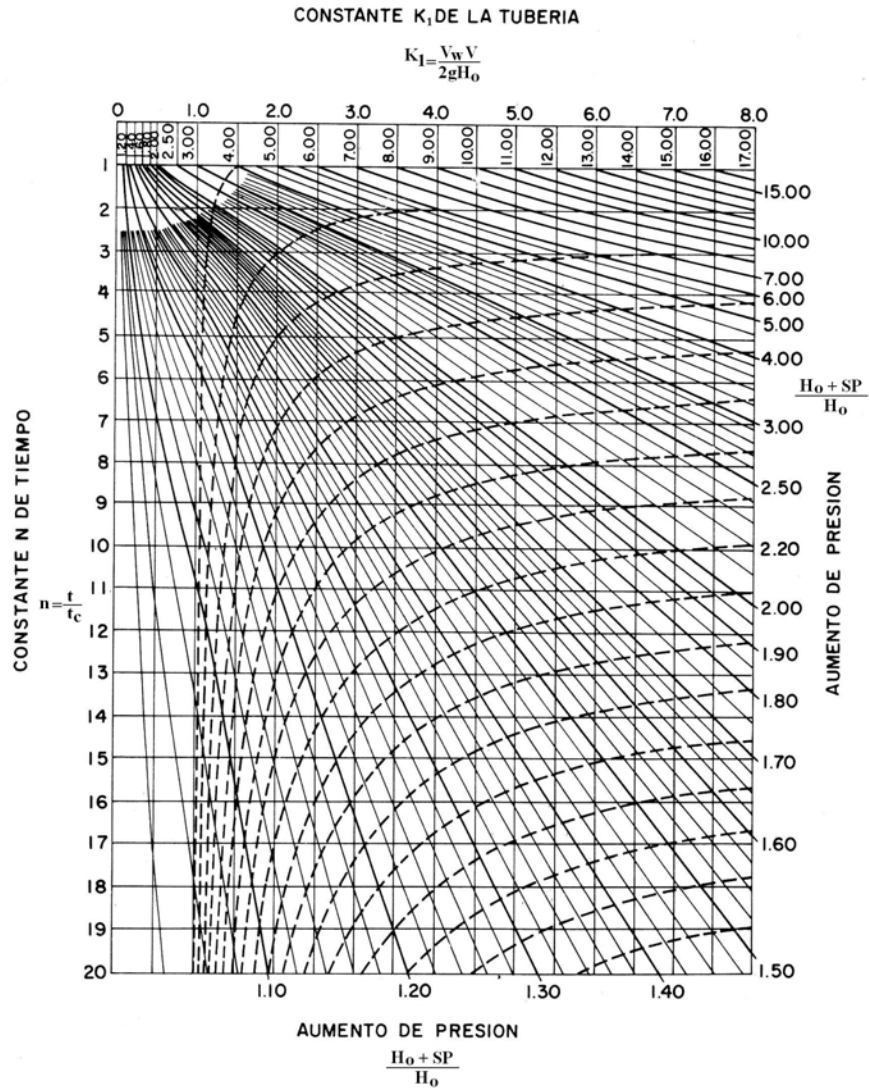


Fig. 2-6 Gráfico de Allievi para la determinación de la sobre presión para cierre lento.

En el caso de cierre lento, la relación entre el tiempo de cierre de la válvula, t y el tiempo crítico, t_c es el número de intervalos de cierre n ; es decir,

$$n = \frac{t}{t_c}$$

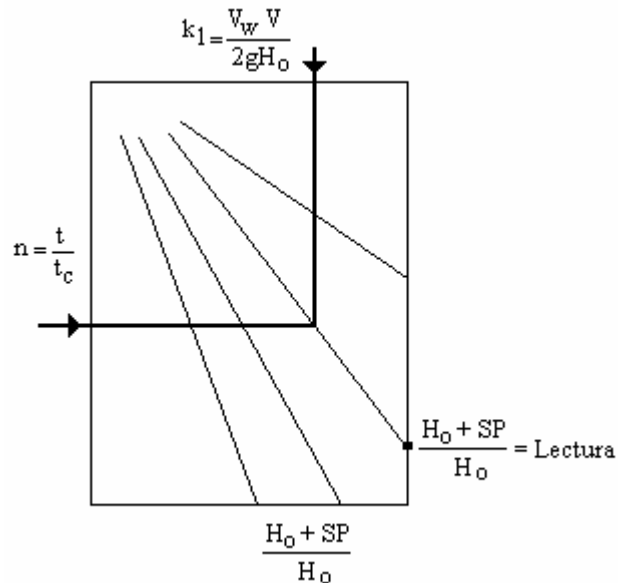
el valor de n se encuentra en el gráfico de Allievi, en la escala vertical izquierda.

En la escala horizontal superior se encuentra el valor de la constante de la tubería K_1 el cual es definido como

$$k_1 = \frac{V_w V}{2 g H_0}$$

donde, H_0 es la diferencia entre la cota de la línea de presión estática LPE y la cota de la válvula.

Conocido el valor del número de intervalos de cierre y la constante de la tubería se encuentra en el gráfico de Allievi como se indica en el siguiente esquema.



En la escala horizontal inferior y en la escala vertical derecha se obtiene un lectura igual a

$$\frac{H_0 + SP}{H_0} = \text{Lectura}$$

y se encuentra el valor de la altura de sobre presión como

$$SP = H_0 (\text{Lectura} - 1)$$

Tanquilla rompecarga

En sistemas de aducción por gravedad, cuando existen presiones elevadas, se deben colocar tuberías muy resistentes, lo que trae como consecuencia un elevado costo de la tubería, de los anclajes y de otros accesorios, esto se puede evitar colocando válvulas reductoras de presión o tanquillas rompecarga en sitios cuidadosamente seleccionados.

La función de la tanquilla rompecarga es la de reducir la presión a cero, para ello el agua en su interior se encuentra en contacto con la atmósfera. Es un tanque, rectangular, pequeño, de concreto armado, con tapas móviles de concreto para impedir la manipulación del agua por personas ajenas a la operación del sistema.

Su parte interior esta formada por dos cámaras separadas por un tabique a media altura que funciona como vertedero sumergido.

La primera cámara denominada de turbulencia posee una válvula, accionada mediante un flotador, que impide la entrada de agua cuando ésta alcanza cierto nivel y un tubo vertical perforado con el fin de disminuir la velocidad de llegada.

La segunda cámara, denominada de salida es una zona relativamente tranquila y tiene como función, evitar la incorporación de aire en el sistema, ya que esto causa grandes inconvenientes de funcionamiento por las posibles bolsas de aire que se podrían formarse en el interior de la tubería dificultando el libre movimiento del agua. Posee una tubería de rebose, por encima de la superficie del agua, con la finalidad de descargar el excedente en el caso de que falle la válvula de control de nivel, una tubería de limpieza colocada a nivel de piso para la realización del mantenimiento periódico y la tubería de salida colocada sobre el fondo de la tanquilla para permitir la acumulación de sedimentos. Todas las válvulas de control deben estar protegidas con cadena y candado para evitar la manipulación por personas ajenas a la operación del sistema. Idealmente se deben ubicar en el interior de tanquillas con tapa metálica y candado.

En el cálculo hidráulico de una tanquilla rompecarga interviene una serie de factores de difícil determinación, por lo que resulta conveniente un estudio sobre modelos considerando presión de entrada, gasto, pérdidas de carga en la entrada y en la salida, asegurando una altura de agua que permita la circulación de gasto de diseño de la línea de aducción.

De acuerdo con las investigaciones en modelos se recomienda:

- chorro de llegada sumergido, lo que se consigue prolongando verticalmente el tubo de llegada
- perforaciones en el dispositivo de llegada con el fin de disminuir la velocidad de llegada.

Adicionalmente se debe tener cuidado en cuanto al agua proveniente del rebose y de la limpieza, para que no pongan en peligro la estabilidad de la estructura conduciendo adecuadamente esta agua hacia cauces seguros.

En la fig. 2-7 se muestra una planta y un corte de un modelo de tanquilla utilizada por la División de Acueductos Rurales.

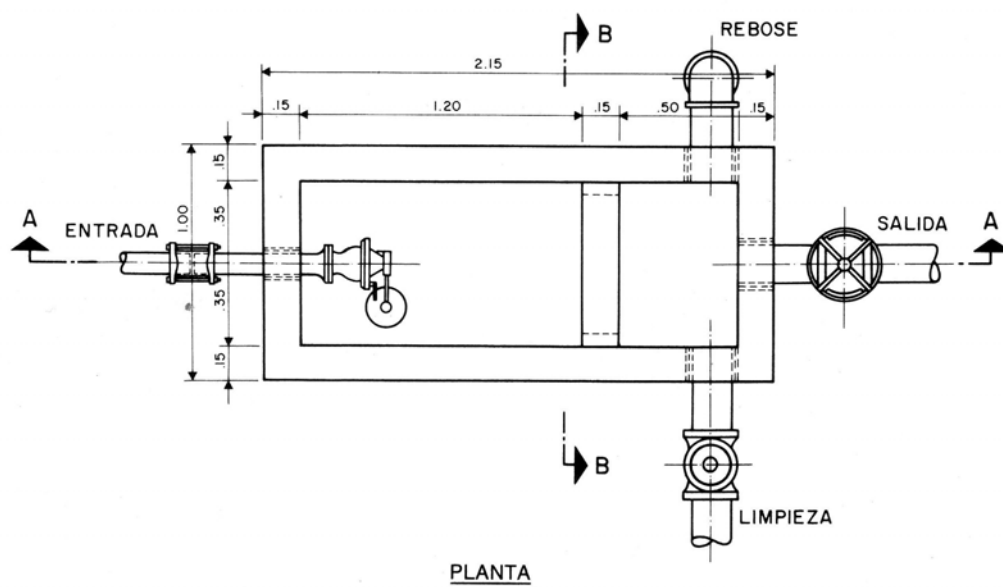
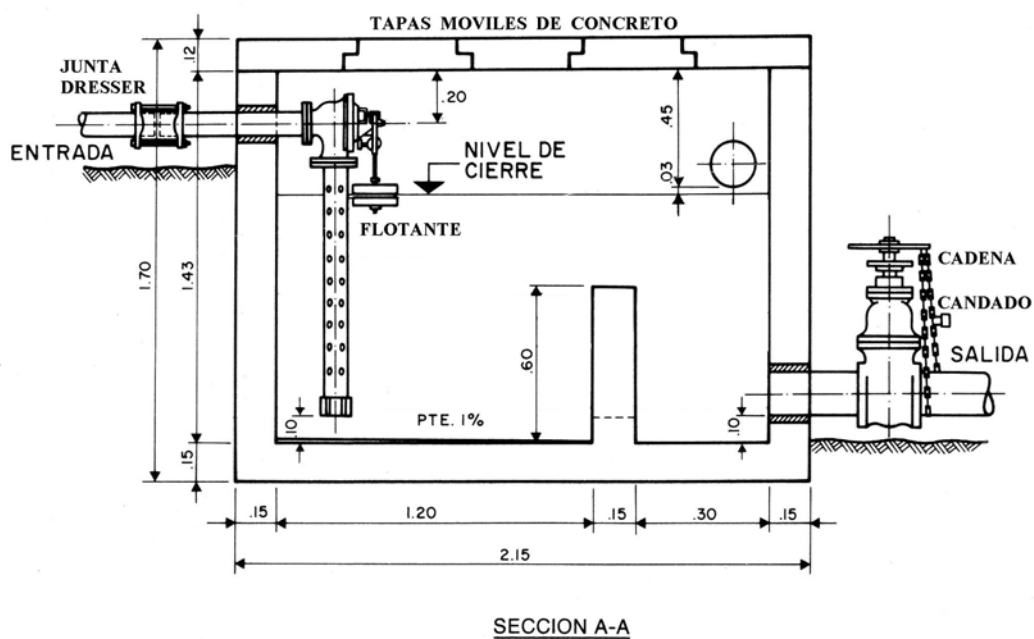


Fig. 2-7 Tanquilla rompecarga (Simón Arocha)

Ejemplo 2.1

Para el esquema que se muestra, se pide:

1. El caudal que circula por el sistema.
2. Cuántos metros de cada clase de tubería, según la norma AWWA, son necesarios para la instalación.

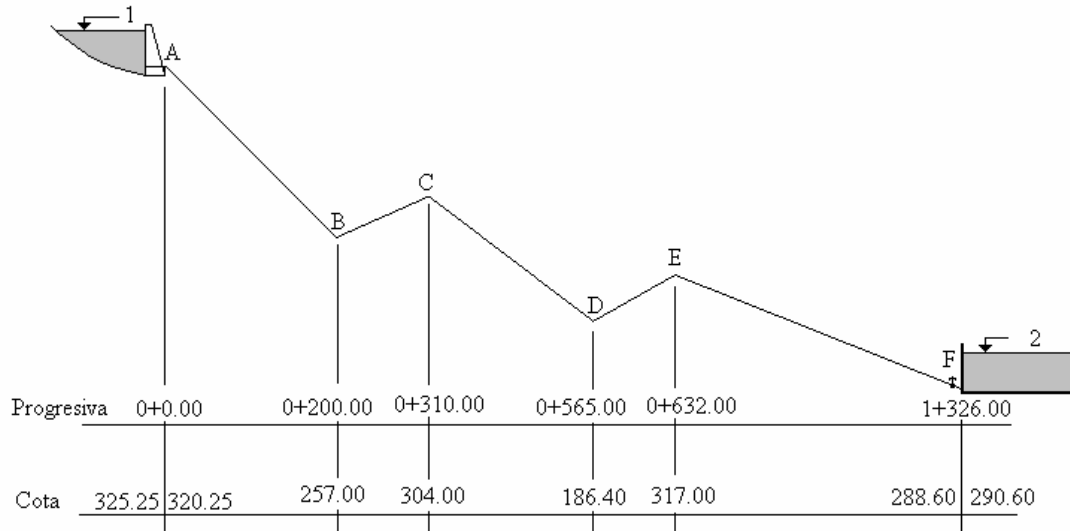
Determinar las pérdidas por fricción mediante la ecuación $h_f = \alpha L Q^{1.85}$.

Asumir que el valor de la sobre presión por el cierre de la válvula es 10.00 m.

Diámetro de la tubería 10",

Coefficiente, C, correspondiente a la fórmula de Hazen – Williams $C = 100$

Pérdidas menores son despreciables.



Determinación de la longitud real de la tubería:

$$L_1 = \sqrt{(200.00 - 0.00)^2 + (320.25 - 257.00)^2} = 209.76 \text{ m}$$

$$L_2 = \sqrt{(310.00 - 200.00)^2 + (304.00 - 257.00)^2} = 119.62 \text{ m}$$

$$L_3 = \sqrt{(565.00 - 310.00)^2 + (304.00 - 186.40)^2} = 280.81 \text{ m}$$

$$L_4 = \sqrt{(632.00 - 565.00)^2 + (317.00 - 186.40)^2} = 146.78 \text{ m}$$

$$L_5 = \sqrt{(1326.00 - 632.00)^2 + (317.00 - 288.60)^2} = 694.58 \text{ m}$$

$$\text{Longitud total} = 1451.55 \text{ m}$$

Determinación del caudal

Aplicando la ecuación de Bernoulli entre las superficies de los tanques en los puntos 1 y 2 se tiene:

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_f$$

$$0.00 + 0.00 + 325.25 = 0.00 + 0.00 + 290.60 + \alpha L Q^{1.85}$$

El coeficiente α , correspondiente a la fórmula de Hazen-Williams, es según la tabla 2-4

$$\alpha = 0.54723 = 0.000004723$$

al sustituir los valores correspondientes en la ecuación de Bernoulli se tiene

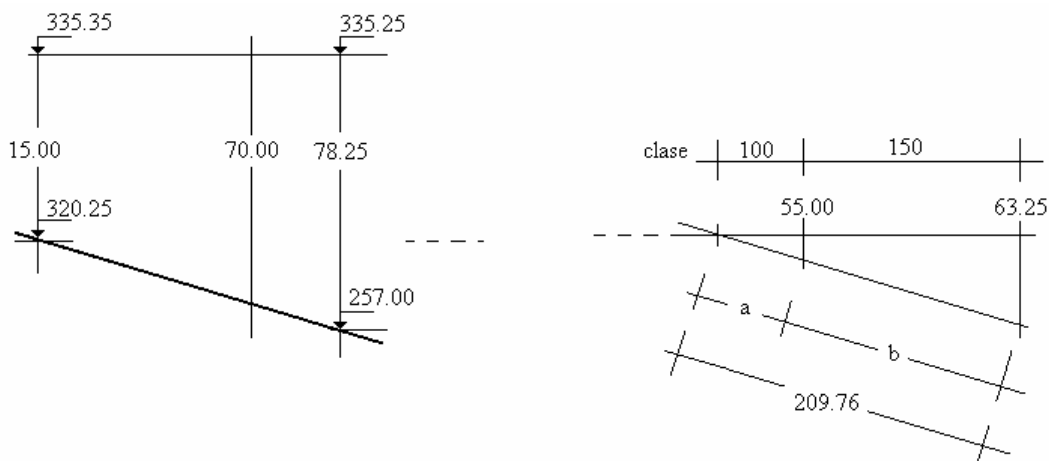
$$325.25 = 290.60 + 0.000004723 \times 1451.55 \times Q^{1.85}$$

$$Q = \left(\frac{325.25 - 290.60}{0.000004723 \times 1451.55} \right)^{\frac{1}{1.85}} = 100.46 \text{ lts/s}$$

Determinación de las clases de tuberías

En el presente caso la presión más desfavorable corresponde al momento en que se está cerrando la válvula; es decir, cuando ocurre la sobre presión, así, para los diferentes tramos se tiene:

Tramo A-B



Determinación de los metros de tubería clase 100

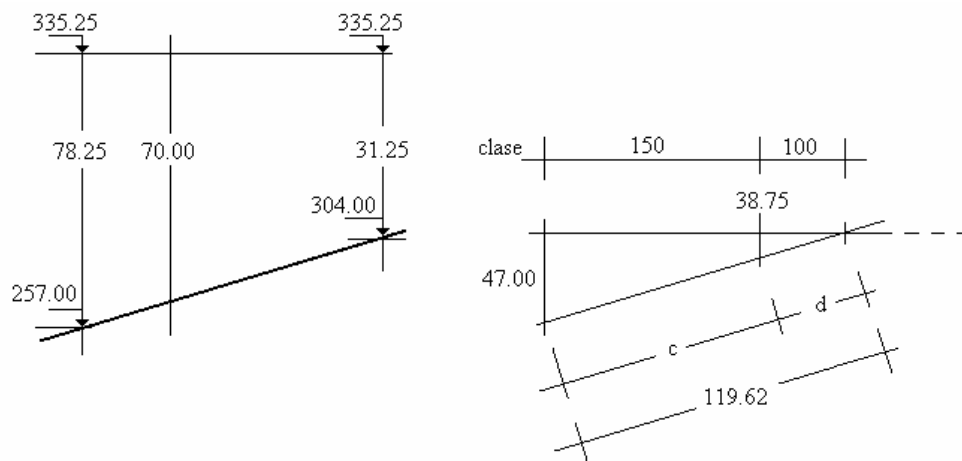
Por relación de triángulos se obtiene:

$$\frac{a}{55.00} = \frac{209.76}{63.25} \Rightarrow a = \frac{209.76 \times 55.00}{63.25} = 182.40 \text{ m}$$

Determinación de los metros de tubería clase 150

$$b = 209.76 - 182.40 = 27.32 \text{ m}$$

Tramo B-C



Determinación de los metros de tubería clase 100

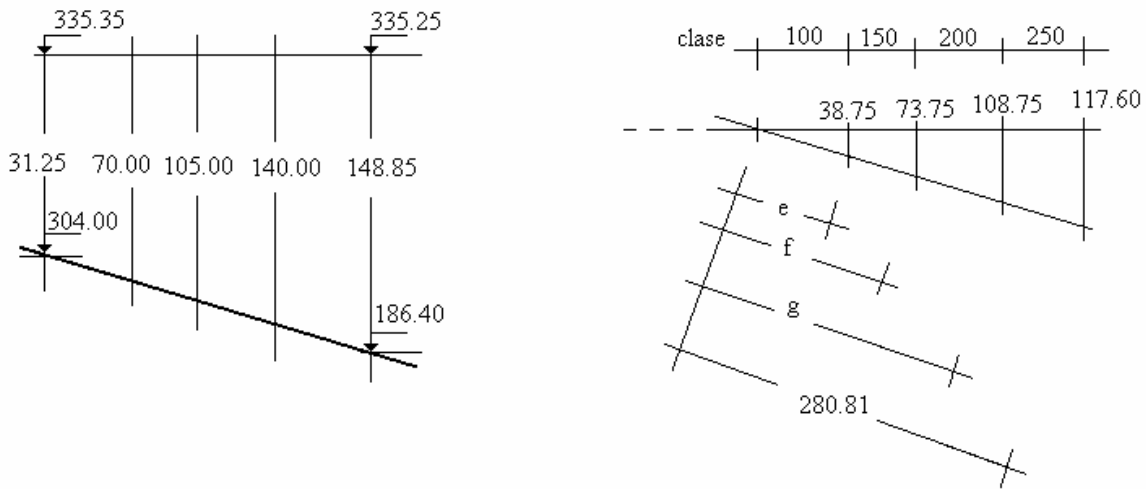
Por relación de triángulos se obtiene:

$$\frac{d}{8.25} = \frac{119.62}{47.00} \Rightarrow d = \frac{119.62 \times 8.25}{47.00} = 98.62 \text{ m}$$

Determinación de los metros de tubería clase 150

$$c = 119.62 - 98.62 = 21.00 \text{ m}$$

Tramo C-D



Determinación de los metros de tubería clase 100

Por relación de triángulos se obtiene:

$$\frac{e}{38.75} = \frac{280.81}{117.60} \Rightarrow e = \frac{280.81 \times 38.75}{117.60} = 92.53 \text{ m}$$

Determinación de los metros de tubería clase 150

Por relación de triángulos se obtiene:

$$\frac{f}{73.75} = \frac{280.81}{117.60} \Rightarrow f = \frac{280.81 \times 73.75}{117.60} = 176.10 \text{ m}$$

$$f - e = 176.10 - 92.53 = 83.57 \text{ m}$$

Determinación de los metros de tubería clase 200

Por relación de triángulos se obtiene

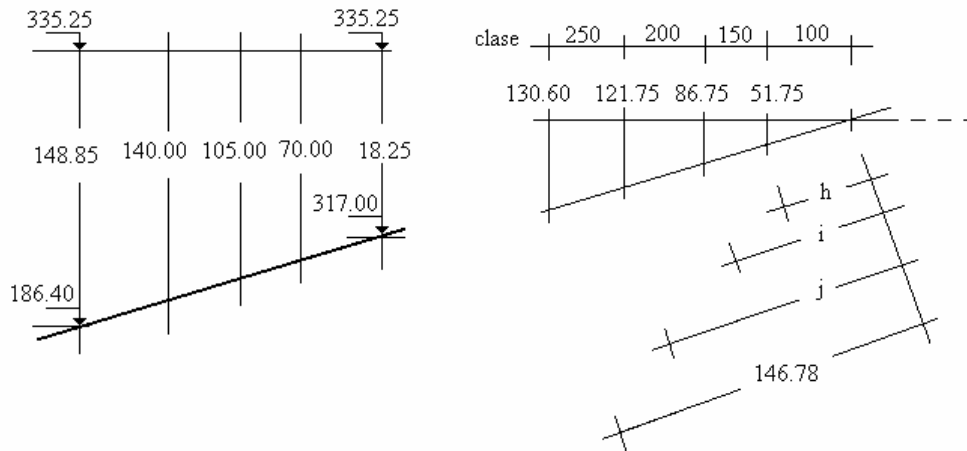
$$\frac{g}{108.75} = \frac{280.81}{117.60} \Rightarrow g = \frac{280.81 \times 108.75}{117.60} = 259.68 \text{ m}$$

$$g - f = 259.68 - 176.10 = 83.58 \text{ m}$$

Determinación de los metros de tubería clase 250

$$280.81 - g = 280.81 - 259.68 = 21.13 \text{ m}$$

Tramo D-E



Determinación de los metros de tubería clase 100

Por relación de triángulos se obtiene:

$$\frac{h}{51.75} = \frac{146.78}{130.60} \Rightarrow h = \frac{146.78 \times 51.75}{130.60} = 58.16 \text{ m}$$

Determinación de los metros de tubería clase 150

Por relación de triángulos se obtiene:

$$\frac{i}{86.75} = \frac{146.78}{130.60} \Rightarrow i = \frac{146.78 \times 86.75}{130.60} = 97.50 \text{ m}$$

$$i - h = 97.50 - 58.16 = 39.34 \text{ m}$$

Determinación de los metros de tubería clase 200

Por relación de triángulos se obtiene:

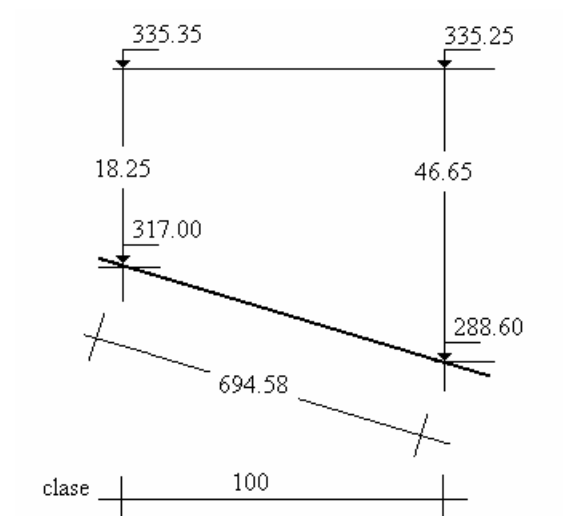
$$\frac{j}{121.75} = \frac{146.78}{130.60} \Rightarrow j = \frac{146.78 \times 121.75}{130.60} = 136.83 \text{ m}$$

$$j - i = 136.83 - 97.50 = 39.33 \text{ m}$$

Determinación de los metros de tubería clase 250

$$146.78 - j = 146.78 - 136.83 = 9.95 \text{ m}$$

Tramo E-F

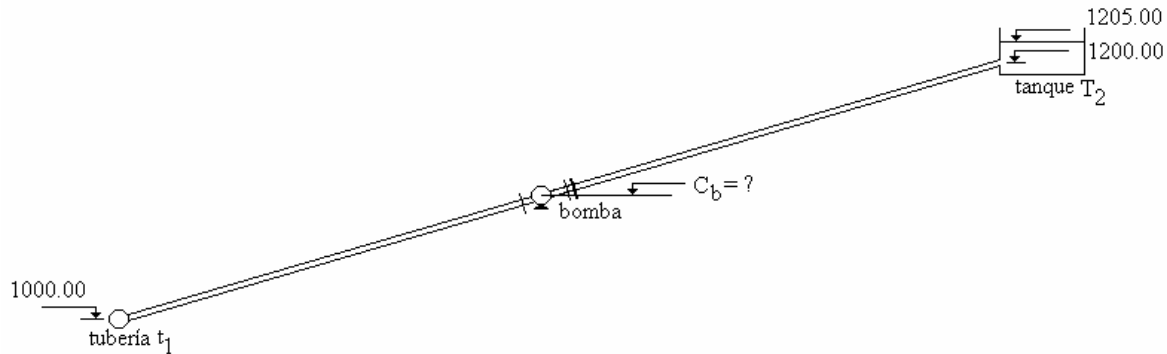


Cuadro resumen

TRAMO	A B	B C	C D	D E	E F	TOTAL
Clase 100	182.40	98.62	92.53	58.16	694.58	1126.29
Clase 150	27.32	21.00	83.57	39.34		171.23
Clase 200			83.58	39.33		122.91
Clase 250			21.13	9.95		31.08

Ejemplo 2.2

En el esquema mostrado circula un caudal de agua de 100 lps, desde la tubería t_1 y al tanque T_2 , determinar:



La cota de la bomba ubicada entre la tubería t_1 y el tanque T_2 , si se quiere que la presión en la entrada de la bomba sea cero.

La potencia de la bomba en CV.

Dibujar la línea de presión dinámica indicando las cotas en t_1 , entrada de la bomba y salida de la bomba.

Suponiendo que la sobre presión entre la salida de la bomba y el tanque T_2 es de 4.00 m de agua, calcular cuantos metros de cada clase de tubería son necesarios colocar en dicho tramo, utilizando la norma AWWA.

Adicionalmente se dispone de la siguiente información:

Diámetro interno de la tubería $\phi = 10''$.

Coefficiente de la fórmula de Hazen-Williams $C = 100$.

Considerar las pérdidas menores, como una longitud equivalente al 10 % de la longitud de la tubería.

Considerar que las pérdidas se pueden determinar como $h_f = \alpha L Q^2$.

La longitud entre la tubería t_1 y el tanque T_2 es de 2000.00 m.

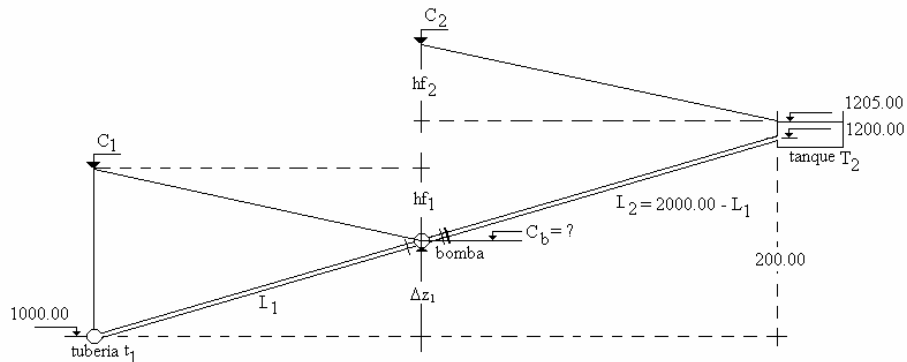
La presión en la tubería t_1 es de 10.00 kg/cm².

En la entrada de la bomba se encuentra instalada una válvula de compuerta y en la salida de esta una válvula de compuerta y una válvula unidireccional.

Nota: Considerar que la línea de presión dinámica y la de energía coinciden, es decir se

desprecia el término $\frac{V^2}{2g}$.

Para el presente caso la línea piezométrica tiene la forma indica en el esquema siguiente:



La expresión general de la pérdida de energía es

$$hf = \alpha L Q^2$$

con $C = 100$, $\phi = 10''$ y $hf = \alpha L Q^2$, se encuentra en la Tabla 2.6 $\alpha = 0.(5)2645$

al sustituir los valores correspondientes en la ecuación anterior se obtiene:

$$hf = 0.000002645 \times 1.10 \times L \times 100^2$$

Determinación de la cota de la línea de presión dinámica C_1 .

$$C_1 = z + \frac{p}{\gamma} = 1000.00 + \frac{100 \times 10^4}{1000} = 1100.00 \text{ m}$$

por relación de triángulos se obtiene

$$\frac{2000}{200} = \frac{L_1}{\Delta z_1} \Rightarrow \Delta z_1 = 0.10 L_1$$

Del esquema se determina que

$$\Delta z_1 + hf_1 = C_1 - 1000.00$$

que al sustituir los valores se obtiene

$$0.10 L_1 + 0.000002645 \times 1.10 \times L_1 \times 100^2 = 1100.00 - 1000.00$$

de donde $L_1 = 774.59 \text{ m}$, por lo tanto $\Delta z_1 = 77.46 \text{ m}$

Determinación de la cota de la bomba C_b .

$$C_b = 1000.00 + \Delta z_1 = 1000.00 + 77.46 = 1077.46 \text{ m.}$$

Determinación de la cota de la línea de presión dinámica C_2 .

Del esquema se determina que

$$C_2 = 1205.00 + hf_2$$

que al sustituir los valores se obtiene:

$$C_2 = 1205.00 + 0.000002645 \times 1.10 \times (2000.00 - L_1) \times 100^2 = 1240.65 \text{ m}$$

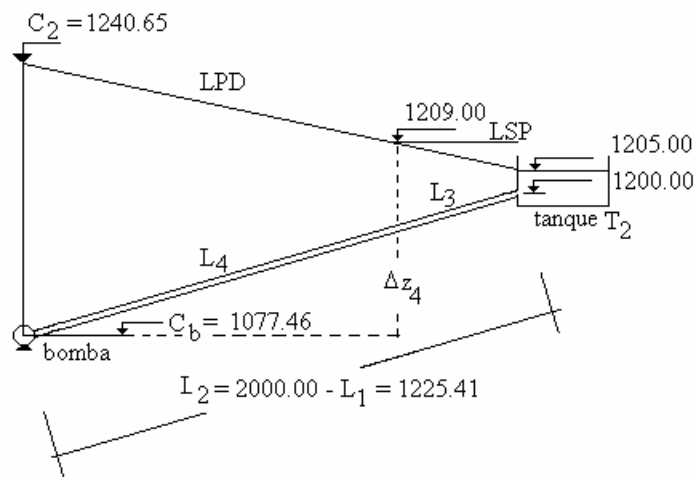
Determinación de la altura de bombeo H_B

$$H_B = C_2 - C_b = 1240.65 - 1077.46 = 163.19 \text{ m.}$$

La potencia de la bomba es

$$P = \frac{Q \gamma H_B}{75} = \frac{0.100 \times 1000 \times 163.19}{75} = 217.59 \text{ CV.}$$

Determinación de las clases de tuberías entre la bomba y el tanque T_2 .



Determinación del punto de corte, entre la línea de presión dinámica y la de sobre presión.

La pérdida de energía entre el punto de corte y el tanque T₂ es igual a 1209.00 – 1205.00 = 4.00 m

Entonces según la ecuación de pérdida de energía se puede obtener:

$$h_f = 0.000002645 \times 1.10 \times L \times 100^2$$

$$4.00 = 0.000002645 \times 1.10 \times L_3 \times 100^2 \quad \Rightarrow \quad L_3 = 137.48 \text{ m}$$

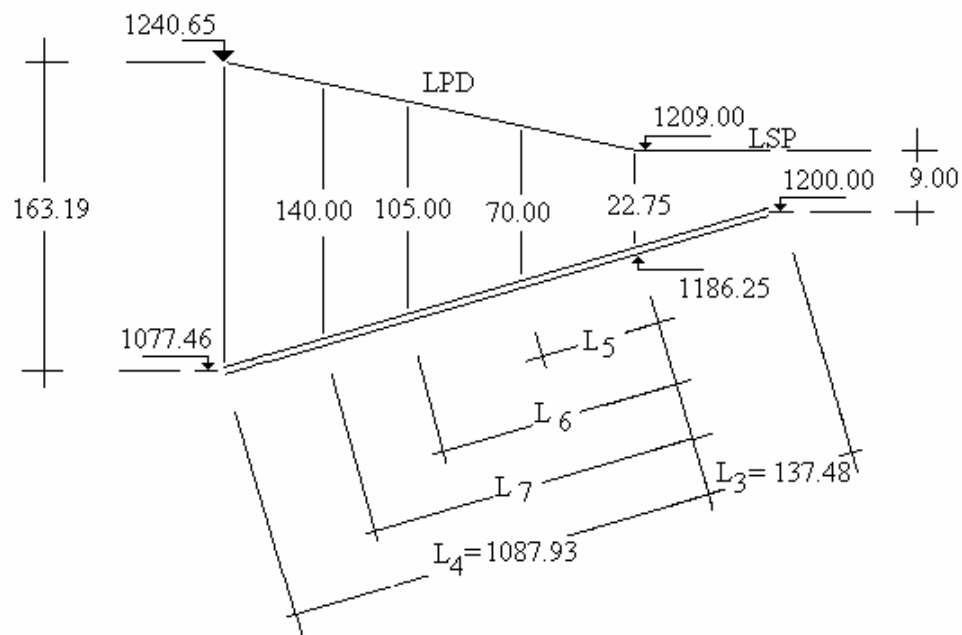
$$L_4 = 1225.41 - L_3 = 1225.41 - 137.48 = 1087.93 \text{ m}$$

por relación de triángulos se obtiene

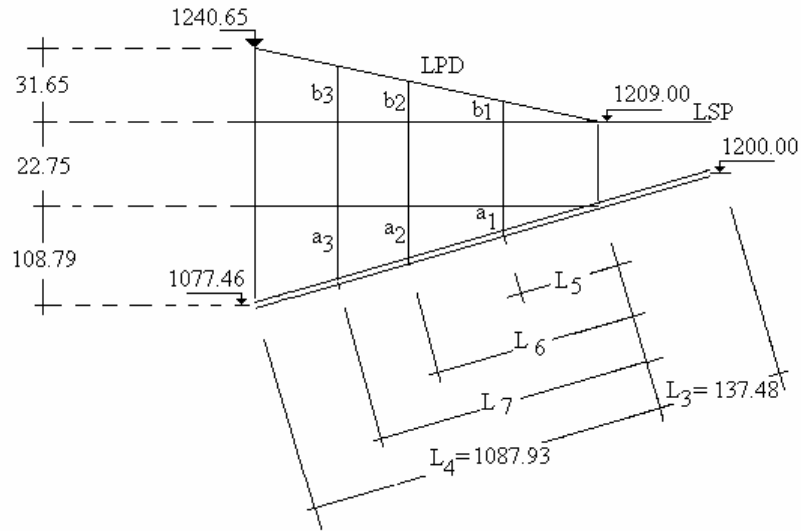
$$\frac{1225.41}{1200 - 1077.46} = \frac{L_4}{\Delta z_4} \quad \Rightarrow \quad \Delta z_4 = 0.10 L_4 = 1087.93 \times 0.10 = 108.79$$

Determinación de la cota del punto B:

$$z_B = 1077.46 + \Delta z_4 = 1077.46 + 108.79 = 1186.25 \text{ m}$$



Analizando el trapecio formado por la línea superior y la tubería se obtiene el siguiente



en el triángulo inferior se tiene

$$\frac{a_1}{L_5} = \frac{108.79}{1087.93} \Rightarrow a_1 = 0.10 L_5, \quad a_2 = 0.10 L_6, \quad a_3 = 0.10 L_7$$

en el triángulo superior se obtiene:

$$\frac{b_1}{L_5} = \frac{31.65}{1087.93} \Rightarrow b_1 = 0.03 L_5, \quad b_2 = 0.03 L_6, \quad b_3 = 0.03 L_7$$

entonces del esquema tendremos:

$$70.00 = a_1 + b_1 + 22.75 \Rightarrow 70.00 = 0.10 L_5 + 0.03 L_5 + 22.75 \Rightarrow L_5 = 363.46 \text{ m}$$

$$105.00 = a_2 + b_2 + 22.75 \Rightarrow 105.00 = 0.10 L_6 + 0.03 L_6 + 22.75 \Rightarrow L_6 = 632.69 \text{ m}$$

$$140.00 = a_3 + b_3 + 22.75 \Rightarrow 140.00 = 0.10 L_7 + 0.03 L_7 + 22.75 \Rightarrow L_7 = 901.92 \text{ m}$$

Resumen de las clases de tuberías

$$\text{Clase 100} \Rightarrow 137.48 + L_5 = 137.48 + 363.46 = 500.96 \text{ m}$$

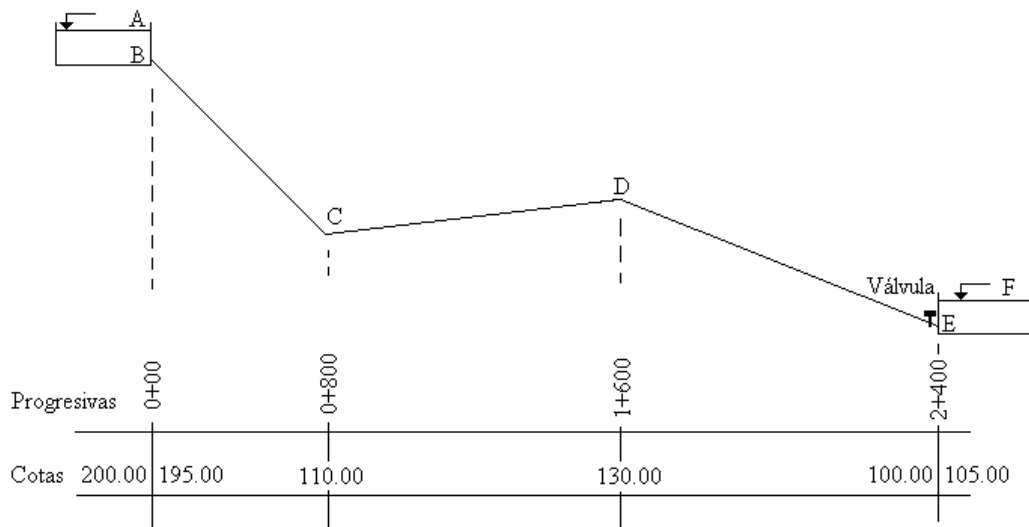
$$\text{Clase 150} \Rightarrow L_6 - L_5 = 632.69 - 363.4 = 269.23 \text{ m}$$

$$\text{Clase 200} \Rightarrow L_7 - L_6 = 901.92 - 632.69 = 265.23 \text{ m}$$

$$\text{Clase 250} \Rightarrow 1087.93 - L_7 = 1087.93 - 901.92 = 186.01 \text{ m}$$

Ejemplo 2.3

Para la aducción por gravedad que se muestra en el esquema dibujar la línea de presión estática, presión dinámica y sobre presión, indicando sus respectivas cotas.



Adicionalmente se dispone de la siguiente información:

Diámetro interno de la tubería $\phi = 20''$

Coefficiente de la fórmula de Hazen-Williams $C = 100$

Módulo de elasticidad del agua $K = 2 \times 10^8 \text{ kg/m}^2$

Módulo de elasticidad del E $= 6 \times 10^9 \text{ kg/m}^2$

Espesor de la pared de la tubería $e = 10 \text{ mm}$

Considerar como pérdidas menores, una longitud equivalente al 10 %

Considerar que las pérdidas se pueden determinar como $h_f = \alpha L Q^2$,

El tiempo de cierre de la válvula es de 50 segundos

Nota: Considerar que la línea de presión dinámica y de energía coinciden, es decir despreciar el término $\frac{V^2}{2g}$.

Determinación de la longitud real de la tubería

$$L_1 = \sqrt{(195.00 - 110.00)^2 + (800.00 - 0.00.00)^2} = 804.50 \text{ m}$$

$$L_2 = \sqrt{(130.00 - 110.00)^2 + (1600.00 - 800.00)^2} = 800.25 \text{ m}$$

$$L_3 = \sqrt{(130.00 - 100.00)^2 + (2400.00 - 1600.00)^2} = \underline{800.56 \text{ m}}$$

La longitud total es = 2405.31 m

Determinación del caudal

Mediante la aplicación de la ecuación de Bernoulli entre los puntos A y F se tiene:

$$\frac{p_A}{\gamma} + \frac{V_A^2}{2g} + z_A = \frac{p_F}{\gamma} + \frac{V_F^2}{2g} + z_F + h_f$$

$$0.00 + 0.00 + 200.00 = 0.00 + 0.00 + 105.00 + \alpha L Q^2$$

con $C = 100$, $\phi = 20''$ y $h_f = \alpha L Q^2$, se encuentra en la tabla 2-6 $\alpha = 0.(7)5886$

al sustituir los valores correspondientes en la ecuación anterior se obtiene:

$$200.00 = 105.00 + 0.00000005886 \times 1.1 \times 2405.31 \times Q^2$$

de donde

$$Q = \left(\frac{200.00 - 105.00}{0.00000005886 \times 2405.31 \times 1.1} \right)^{1/2} = 781 \text{ lps}$$

Determinación de la sobre presión

La velocidad media es:

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{0.781}{\frac{\pi}{4} (20 \times 2.54 \times 10^{-2})^2} = 3.86 \text{ m/s}$$

La velocidad de propagación de la onda de presión es:

$$V_w = \frac{1420}{\sqrt{1 + \frac{K d}{E e}}}$$

que al sustituir los valores numéricos se obtiene:

$$V_w = \frac{1420}{\sqrt{1 + \frac{2 \times 10^8 \times (20 \times 2.54 \times 10^{-2} + 2 \times 0.01)}{6 \times 10^9 \times 0.01}}} = 854.74 \text{ m/s}$$

El tiempo crítico es:

$$t_c = \frac{2 L}{V_w}$$

Al sustituir los valores numéricos se obtiene:

$$t_c = \frac{2 \times 2405.31}{854.74} = 5.62 \text{ s}$$

como el tiempo de cierre de la válvula es mayor que el tiempo crítico $t > t_c$, entonces el cierre es lento y para la determinación de la sobre presión se utiliza el gráfico de Allievi el cual se encuentra en la Fig. 2-6.

Determinación de los intervalos de cierre n

$$n = \frac{t}{t_c} = \frac{50.00}{5.62} = 8.90$$

Determinación de la constante de la tubería k_1

$$k_1 = \frac{V_w V}{2 g H_0} = \frac{854.74 \times 3.86}{2 \times 9.81 \times (200.00 - 100.00)} = 1.68$$

con los valores de k_1 y n se encuentra en la Fig. una lectura de 1.22

$$\text{es decir } 1.22 = \frac{H_0 + SP}{H_0}$$

$$SP = H_0 (\text{Lectura} - 1)$$

$$SP = 100.00 (1.22 - 1) = 22.00 \text{ m}$$

Determinación de cotas:

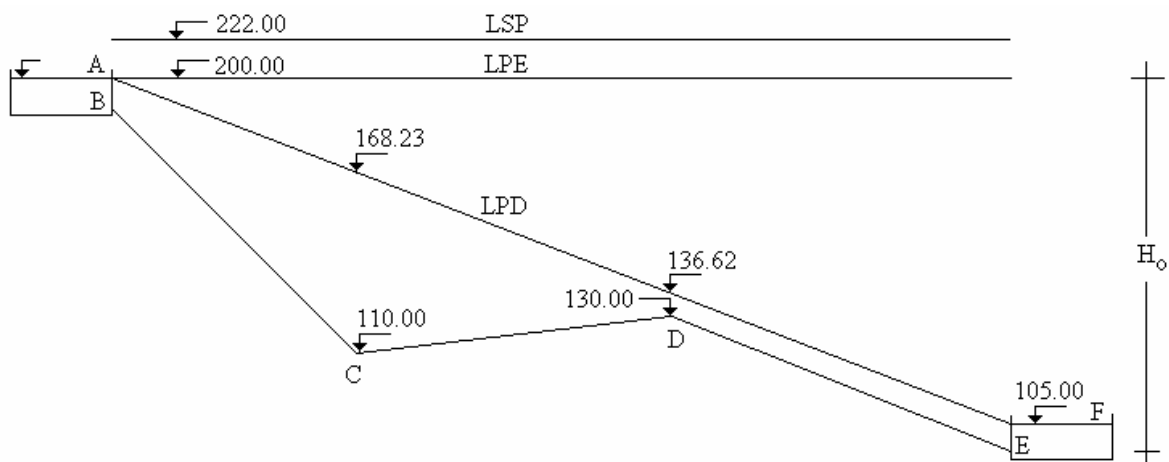
La cota de la línea de sobre presión, cuando la válvula se está cerrando es 220.00 m.

La cota de la línea de presión estática, cuando la válvula está cerrada es 200.00 m.

La cota de la línea de presión dinámica en el punto C es

$$\text{Cota C} = 200.00 - h_{fB-C} = 200.00 - 0.00000005886 \times 1.10 \times 804.50 \times 781^2 = 168.23 \text{ m}$$

$$\text{Cota D} = 200.00 - h_{fB-D} = 200.00 - 0.00000005886 \times 1.10 \times 1604.50 \times 781^2 = 136.62 \text{ m}$$

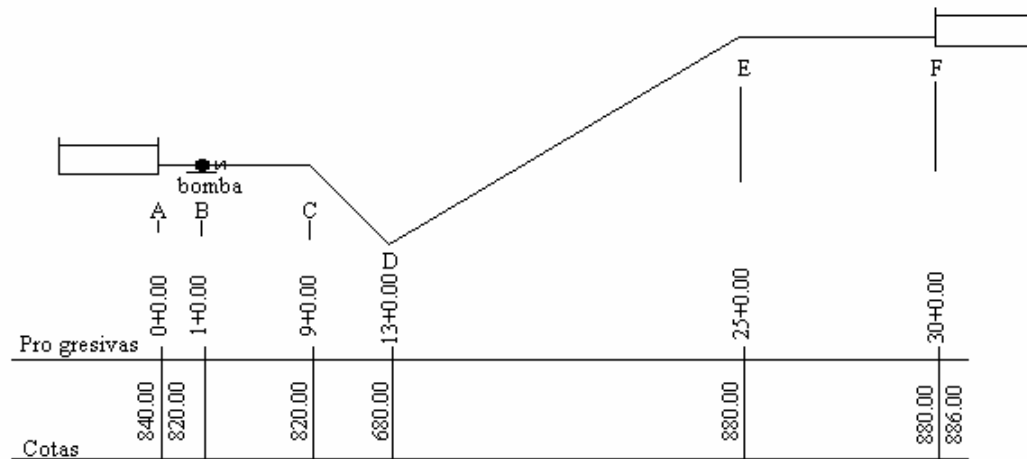


Ejemplo2.4

Para el sistema de bombeo que se muestra en el esquema se pide:

Dibujar las líneas de presión estática, presión dinámica y sobre presión indicando sus cotas.

Cuál es el valor de la máxima presión en kg/cm^2 .



Adicionalmente se dispone de la siguiente información:

El caudal que circula por el sistema es de 25 lps.

El diámetro de la tubería es de 250 mm.

El espesor de la tubería es de 7 mm

El coeficiente C correspondiente de Hazen Williams es $C = 100$.

Las pérdidas por fricción pueden ser determinadas como $h_f = \alpha L Q^{1.85}$.

Considerar el 8% como longitud equivalente, por efectos de pérdidas menores.

Módulo de elasticidad del material de la tubería, $E = 6 \times 10^9 \text{ kg/m}^2$.

Módulo de elasticidad volumétrico del agua, $K = 2 \times 10^8 \text{ kg/m}^2$.

Línea de presión estática

La línea de presión estática se produce cuando el sistema se encuentra en reposo; es decir, la bomba no está funcionando, entonces la válvula Check se encuentra cerrada. De la bomba hacia la derecha la línea de presión estática está determinada por la cota del tanque superior, es decir la cota 886.00, de la bomba hacia la izquierda la línea de presión estática está determinada por la cota del tanque inferior, es decir la cota 840.00, como se muestra en el esquema general de líneas de presión.

Línea de sobre presión.

En el caso de sistemas por bombeo, cuando existe una falla de energía eléctrica o cuando se termina el ciclo de funcionamiento de la bomba, la válvula Check que se encuentra aguas debajo de la bomba, se cierra instantáneamente alcanzando el máximo valor la sobre presión; es decir, existe un cierre instantáneo.

La velocidad media del agua antes de la parada de la bomba es:

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{\frac{\pi}{4} D^2} = \frac{25 \times 10^{-3}}{\frac{\pi}{4} (250 \times 10^{-3})^2} = 0.51 \text{ m/s}$$

y el aumento de presión que se produce es:

$$\Delta P = V \sqrt{\frac{\gamma}{g} \frac{K e E}{E e + K d}} = 0.51 \sqrt{\frac{1000}{9.81} \frac{2 \times 10^8 \times 0.007 \times 6 \times 10^9}{6 \times 10^9 \times 0.007 + 2 \times 10^8 (0.250 + 2 \times 0.007)}}$$

$$\Delta P = 48484 \text{ kg/m}^2$$

$$SP = \frac{\Delta P}{\gamma} = \frac{48484}{1000} = 48.48 \text{ m}$$

Por lo que la cota de la línea de sobre presión es $886.00 + 48.48 = 934.48 \text{ m}$, como se muestra en el esquema general de líneas de presión.

Línea presión dinámica.

Por efecto de fricción, la línea de presión dinámica disminuye de cota, desde la salida del tanque A, hasta la entrada de la bomba, en la bomba se le adiciona energía y nuevamente por efecto de fricción esta disminuye de cota hasta llegar al tanque F, como se muestra en el esquema general de líneas de presión.

Determinación de las pérdidas de energía por efecto de la fricción

Pérdida de energía entre la salida del tanque A y la entrada de la bomba B

con $c = 100$, en la Tabla 2-3 $\alpha = 0.5081$

$$h_f = \alpha L Q^{1.85} = 0.000005081 \times 1.08 \times 1000 \times 25^{1.85} = 2.12 \text{ m}$$

La cota de la línea de energía en la entrada de la bomba es:

$$\text{Cota LPD} = 840.00 - 2.12 = 837.88 \text{ m}$$

Pérdidas de energía entre la salida de la bomba B y el tanque F

Determinación de las longitudes reales de tubería

$$L_{CD} = \sqrt{(13000.00 - 9000.00)^2 + (820.00 - 680.00)^2} = 4002.45 \text{ m}$$

$$L_{DE} = \sqrt{(25000.00 - 13000.00)^2 + (880.00 - 680.00)^2} = 12001.67 \text{ m}$$

$$h_f = \alpha L Q^{1.85} = 0.000005081 \times 1.08 (8000 + 4002.45 + 12001.67 + 5000) 25^{1.85} = 61.38 \text{ m}$$

La cota de la línea de energía en la salida de la bomba es:

$$\text{Cota LPD} = 886.00 + 61.38 = 947.38 \text{ m}$$

Como la cota de la línea de sobre presión es menor que la cota de la línea de presión dinámica, en la salida de la bomba quiere decir que ambas líneas se cortan.

Determinación del punto de corte de la línea de sobre presión y la línea de presión dinámica.

Las pérdidas por fricción entre la salida de la bomba y el punto de corte es:

$$h_{f(B-M)} = 947.38 - 934.48 = 12.90 \text{ m}$$

La longitud $L_{(B-M)}$, correspondiente a esas pérdidas es:

$$h_f = \alpha L Q^{1.85} = 12.90 = 0.000005081 \times 1.08 L_{(B-M)} 25^{1.85}$$

$$L_{(B-M)} = 6095.75 \text{ m}$$

Los resultados de las líneas de presión estática, línea de sobre presión y línea de presión dinámica calculados anteriormente se muestran en un solo esquema, aunque estas ocurren en diferentes momentos.

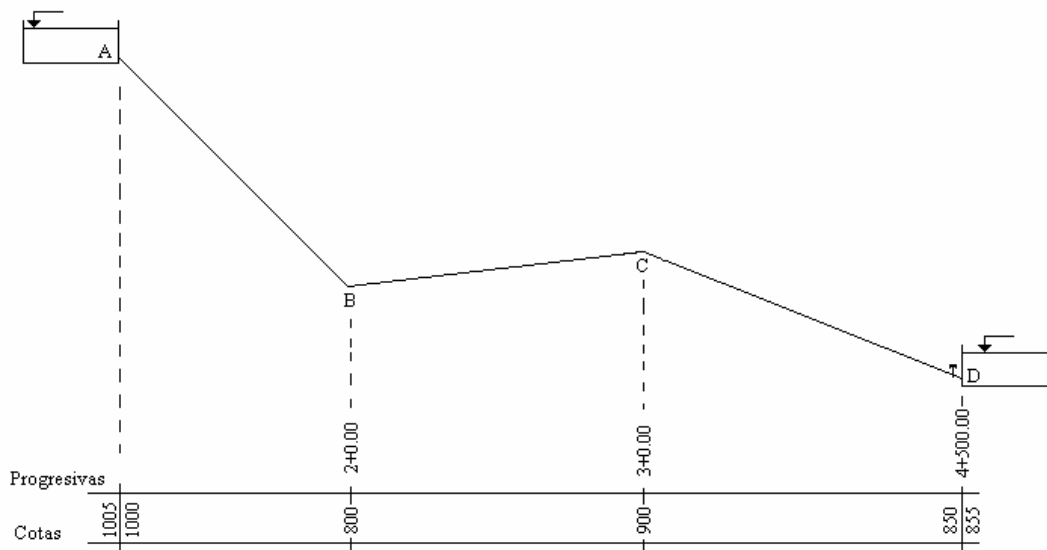
Ejemplo 2.5

Para la aducción por gravedad de 10" de diámetro y coeficiente $C = 100$, que se muestra en el siguiente esquema determinar, despreciando los efectos producidos por la sobre presión y las pérdidas menores:

El caudal, considerando que las pérdidas por fricción pueden determinan como $h_f = \alpha L Q^2$.

Colocar una tanquilla rompe carga si la máxima presión que puede soportar tubería a utilizar es de 14 kg/cm^2 .

Cuál debe ser el diámetro de la tubería desde la tanquilla, T_q , hasta el punto D, para mantener el mismo caudal determinado en al punto 1.



Determinación de las longitudes de la tubería

$$L_{AB} = \sqrt{(2000.00 - 0.00)^2 + (1000.00 - 800.00)^2} = 2009.98 \text{ m}$$

$$L_{BC} = \sqrt{(3000.00 - 2000.00)^2 + (900.00 - 800.00)^2} = 1004.99 \text{ m}$$

$$L_{CD} = \sqrt{(4500.00 - 3000.00)^2 + (900.00 - 850.00)^2} = \underline{1500.83 \text{ m}}$$

La longitud total es $= 4551.80 \text{ m}$

Aplicando la ecuación de Bernoulli entre la superficie de ambos tanques se tiene:

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_f$$

$$0 + 0 + 1005.00 = 0 + 0 + 855.00 + 0.000002645 \times 4551.80 \times Q^2$$

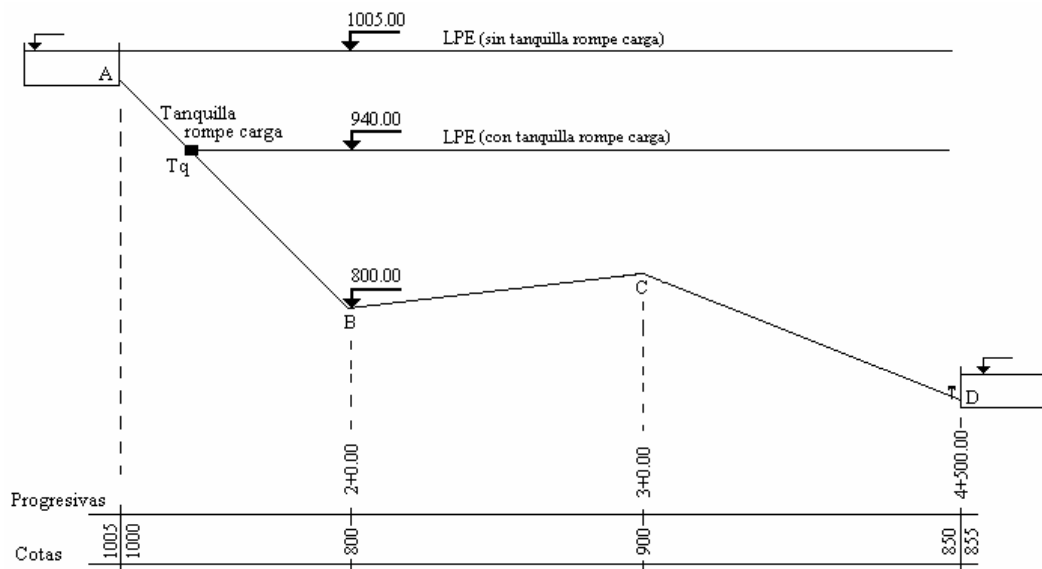
$$Q = 112.06 \text{ lps}$$

Ubicación de la tanquilla rompe carga

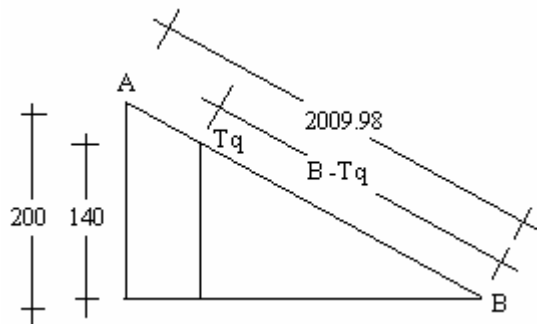
Una presión de 14 kg/cm^2 equivale en metros de agua a

$$h = \frac{p}{\gamma} = \frac{14 \times 10^4}{1000} = 140 \text{ m}$$

el punto donde ocurre la máxima presión es en el punto más bajo de la tubería; es decir, en el punto B que tiene una cota de 800.00 m, por lo tanto, para que la máxima altura de presión sea de 140 m de agua, la tanquilla se debe ubicar en la cota $(800.00 + 140.00) = 940.00 \text{ m}$, según se muestra en el siguiente esquema.



La distancia inclinada desde el punto B, hacia aguas arriba, hasta la tanquilla Tq es:



$$\frac{L(B - Tq)}{140} = \frac{2009.98}{200} \Rightarrow L(B - Tq) = 1406.99 \text{ m}$$

Determinación del diámetro desde la tanquilla Tq hasta el punto D

Aplicando la ecuación de Bernoulli se tiene

$$\frac{p_{Tq}}{\gamma} + \frac{V_{Tq}^2}{2g} + z_{Tq} = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_f$$

$$0 + 0 + 940.00 = 0 + 0 + 855.00 + \alpha (1406.99 + 1004.99 + 1500.83) 112.06^2$$

$$\alpha = 1.730 \times 10^{-6} \Rightarrow \alpha = 0.(5)1730$$

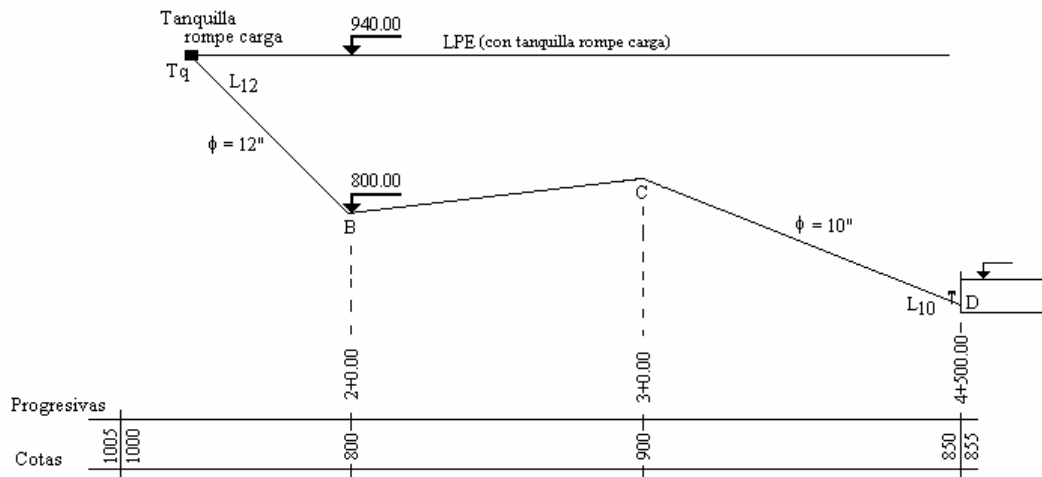
De la tabla 2-6 para C = 100 se han extraído los siguientes valores:

Diámetro (pulgadas)	C = 100
10	0.(5)2645
?	0.(5)1730
12	0.(5)1017

Esto quiere decir que el diámetro necesario estaría entre 10" y 12" que por supuesto no se fabrica comercialmente, si se tomara un diámetro de 12" circularía un caudal mayor que 112.06 lps y si se tomara un diámetro de 10" circularía un caudal menor que 112.06 lps, entonces la solución sería colocar desde la tanquilla, hacia aguas abajo un tramo con un diámetro de 12" y luego otro tramo con un diámetro de 10", como se indica a continuación:

$$L_{Tq} = 1406.99 + 1004.99 + 1500.83 = 3912.81$$

$$L_{Tq} = L_{12} + L_{10} \Rightarrow L_{10} = L_{Tq} - L_{12}$$



Determinación de las longitudes L_{12} y L_{10} desde la tanquilla Tq hasta el punto D , mediante la aplicación de Bernoulli

$$\frac{p_{Tq}}{\gamma} + \frac{V_{Tq}^2}{2g} + z_{Tq} = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_{f12} + h_{f10}$$

$$0 + 0 + 940.00 = 0 + 0 + 855.00 + 0.000001017 L_{12} 112.06^2 + 0.000002645 (3912.81 - L_{12}) 112.06^2$$

$$L_{12} = 2242.60 \text{ m} \Rightarrow L_{10} = L_{Tq} - L_{12} \Rightarrow L_{10} = 3912.81 - 2242.60 = 1670.21 \text{ m}$$

Capítulo 3

Anclajes

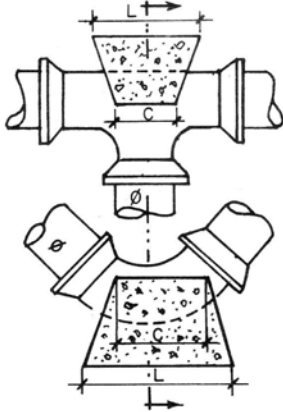
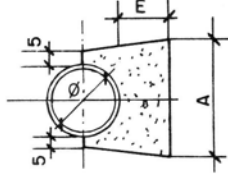
En el diseño de líneas de aducción colocadas sobre soportes ó enterradas, se presentan con frecuencia cambios de dirección en sentido vertical, horizontal o ambos a la vez, cambio del diámetro, derivaciones, válvulas o secciones terminales, las cuales pueden provocar un desequilibrio de las distintas fuerzas actuantes que intentarán desplazar la tubería. La función del anclaje es trasladar al terreno esos esfuerzos para evitar la falla de las tuberías y sus accesorios.

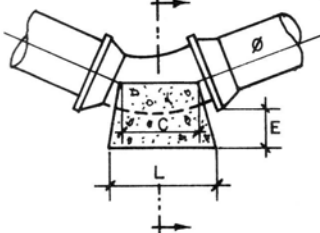
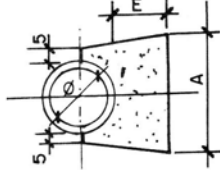
Para analizar los anclajes, se establece la igualdad de las fuerzas y los momentos actuantes con los resistentes, considerando los factores de seguridad correspondientes. Puede ser que la tubería este en contacto directo con el suelo y éste absorba todos los esfuerzos y se mantenga en equilibrio o bien que sea necesario colocar una estructura o anclaje que transmitan las acciones al suelo o agreguen el peso necesario para la estabilidad. En el caso del contacto directo, cuando la fricción alrededor del tubo, resista la fuerza axial o cuando la sobrecarga del relleno sirva para contrarrestar la fuerza actuante y dirigida hacia arriba producida por ejemplo, en ciertos codos verticales en los cuales no es necesario la construcción de anclajes.

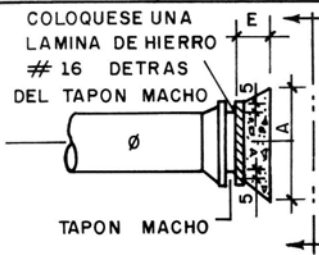
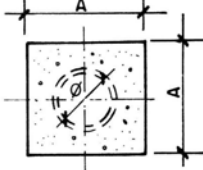
En el caso de tapones terminales, provisionales o definitivos se debe colocar un bloque de anclaje con el fin de absorber el empuje máximo. Se deben de satisfacer las leyes de estáticas al dimensionar el anclaje.

Considerar el relleno o las paredes de las zanjas para resistir las fuerzas actuantes presenta el inconveniente de que si este material es removido, la tubería queda sin quien absorba estos esfuerzos.

En algunos casos, donde las fuerzas son de pequeña magnitud, por ejemplo como las generadas por una altura de presión de unos 100 m de agua, se pueden usar apoyos o anclajes sencillos, como los indicados en los detalles típicos del Ing. Harry Osers, según se indica en la Fig. 3-1.

PLANTA	SECCION O VISTA	CODOS A 90°										
		TEES (Segun Ø de salida)										
		Ø	MM	150	200	250	300	350	400	450	500	600
		Pulg.	6"	8"	10"	12"	14"	16"	18"	20"	24"	
		E	Cm	30	30	30	30	30	30	40	50	50
		L	Cm	45	60	75	85	105	125	135	135	175
		A	Cm	30	40	50	60	70	70	85	100	110
C	Cm	25	35	45	55	75	90	95	110	125		

		CODOS A 45°										
		Ø	MM	150	200	250	300	350	400	450	500	600
		Pulg.	6"	8"	10"	12"	14"	16"	18"	20"	24"	
		E	Cm	15	15	15	15	20	20	25	25	40
		L	Cm	30	40	50	60	70	85	100	115	140
		A	Cm	30	35	40	45	50	55	65	70	80
C	Cm	25	35	40	50	55	65	70	80	90		

<p>COLOQUESE UNA LAMINA DE HIERRO # 16 DETRAS DEL TAPON MACHO</p>  <p>TAPON MACHO</p>	 <p>VISTA DEL TAPON</p>	TAPONES										
		Ø	MM	150	200	250	300	350	400	450	500	600
		Pulg.	6"	8"	10"	12"	14"	16"	18"	20"	24"	
		E	Cm	15	15	15	15	20	25	30	35	45
		A	Cm	30	40	50	60	70	80	90	100	120

NOTAS: EL ESPESOR "E" PUEDE SER MAYOR QUE EL ESPECIFICADO.

USESE CONCRETO DE $R=100 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2}$

LOS POSTES DE ANCLAJES DEBEN SER VACIADOS SOBRE TERRENOS NO REMOVIDOS.

LAS DIMENSIONES INDICADAS ESTAN REFERIDAS AL MINIMO, PERO PUEDEN SER AMPLIADAS A JUICIO DEL INGENIERO PROYECTISTA;

LOS ANCLAJES ESPECIFICADOS PARA Ø (6") 150mm SE USARAN TAMBIEN PARA DIAMETROS MENORES.

Fig. 3-1 Anclajes típicos para tee, codos y tapones, según Harry Osers.

Las fuerzas que actúan en el cambio de alineación de la tubería se muestran en la Fig.3-2 son las siguientes:

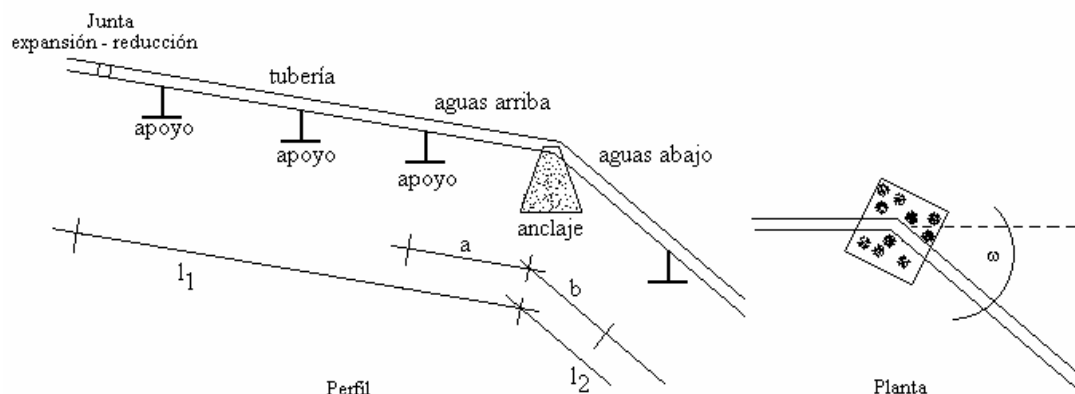


Fig. 3-2 Perfil y planta de una tubería con doble cambio de alineación.

Fuerzas actuantes en los anclajes

Fuerza por presión

Es la fuerza de confinamiento originada por la presión y se determina con el valor máximo de la presión que puede ocurrir en una determinada sección; es decir, tomando la condición más desfavorable entre la presión estática, la presión dinámica o la sobre presión que pueda ocurrir por el cierre de una válvula.

a. Fuerza aguas arriba

$$F = \gamma \Delta h A_1 \quad \text{ec. 3.1}$$

donde:

F es la fuerza producida por la presión, según el eje de la tubería en kg.

γ es el peso específico del agua expresado en kg/cm^2 .

Δh es la diferencia de elevación entre la cota de la línea de presión más desfavorable y la cota del punto considerado.

A_1 es el área interna de la sección transversal, aguas arriba, en m^2 .

b. Fuerza aguas abajo

$$F = \gamma \Delta h A_2 \quad \text{ec. 3.2}$$

donde:

A_2 es el área interna de la sección transversal, aguas abajo, en m^2 .

Fuerza por velocidad

Es la fuerza originada por la velocidad, debido a la variación de la cantidad de movimiento y tiene la misma dirección que la fuerza de presión.

a. Fuerza aguas arriba

$$F = \frac{\gamma}{g} Q V_1 \quad \text{ec. 3.3}$$

donde:

Q es el caudal que circula por la tubería, en m^3/s .

g es la aceleración de la gravedad, en m/s^2 .

V_1 es la velocidad media, en la sección de aguas arriba, en m/s .

b. Fuerza aguas abajo

$$F = \frac{\gamma}{g} Q V_2 \quad \text{ec. 3.4}$$

donde:

V_2 es la velocidad media, en la sección de aguas abajo, en m/s .

Fuerza por el peso de la tubería

a. Fuerza aguas arriba

$$F = pp_1 l_1 \text{ sen } \alpha \quad \text{ec. 3.5}$$

donde:

- pp_1 es el peso unitario de la tubería, aguas arriba del punto considerado, en kg/m.
- l_1 es la longitud desde el punto considerado hasta la junta de dilatación colocada aguas arriba en m.
- α es el ángulo que la tubería de aguas arriba forma con la horizontal.

b. Fuerza aguas abajo

$$F = pp_2 l_2 \text{ sen } \beta \quad \text{ec. 3.6}$$

donde:

- pp_2 es el peso unitario de la tubería, aguas abajo del punto considerado, en kg/m.
- l_2 es la longitud desde el punto considerado hasta la junta de dilatación, colocada aguas arriba en m.
- β es el ángulo que la tubería de aguas abajo forma con la horizontal.

Fuerza por fricción entre los apoyos y la tubería

Estas fuerzas se generan aguas arriba y aguas abajo, en sentido convergente hacia el eje en caso de dilataciones y en sentido divergente en el caso de contracciones.

a. Fuerza aguas arriba

$$F = f \cos \alpha \left(pp_1 l_1 + \gamma l_1 A_1 - \left(\frac{pp_1 + \gamma A_1}{2} \right) a \right) \quad \text{ec. 3.7}$$

donde:

- f es el coeficiente de fricción entre la tubería y el apoyo.
- A_1 es el área de la sección transversal de la tubería, aguas arriba en m^2 .
- a es la longitud de la tubería desde el punto considerado hasta el apoyo más cercano ubicado aguas arriba.

b. Fuerza aguas abajo

$$F = f \cos \beta \left(p p_2 l_2 + \gamma l_2 A_2 - \left(\frac{p p_2 + \gamma A_2}{2} \right) b \right) \quad \text{ec. 3.8}$$

donde:

A_2 es el área de la sección transversal de la tubería, aguas abajo en m^2 .

b es la longitud de la tubería desde el punto considerado hasta el apoyo más cercano ubicado aguas abajo.

Fuerza por fricción en la junta de dilatación

a. Fuerza aguas arriba

$$F = f_1 \pi (d_1 + 2 e_1) \quad \text{ec. 3.9}$$

donde:

f_1 es el coeficiente de fricción en la junta, aguas arriba del punto considerado, en kg/m.

d_1 es el diámetro interno de la tubería, aguas arriba del punto considerado, en m.

e_1 es el espesor de la tubería aguas arriba del punto considerado, en m.

b. Fuerza aguas abajo

$$F = f_2 \pi (d_2 + 2 e_2) \quad \text{ec. 3.10}$$

donde:

f_2 es el coeficiente de fricción en la junta, aguas abajo del punto considerado, en kg/m.

d_2 es el diámetro interno de la tubería, aguas abajo del punto considerado, en m.

e_2 es el espesor de la tubería aguas abajo del punto considerado, en m.

Una vez determinada la dirección y magnitud de todas las fuerzas actuantes se procederá al dimensionamiento del anclaje asegurando su estabilidad al volcamiento, deslizamiento y asentamiento debiendo verificarse que la fuerza resultante pase por el tercio central, con el fin de evitar tracción en el concreto.

En la Fig. 3-3 se muestra un esquema vertical de las fuerza actuantes en un cambio de alineación de una tubería.

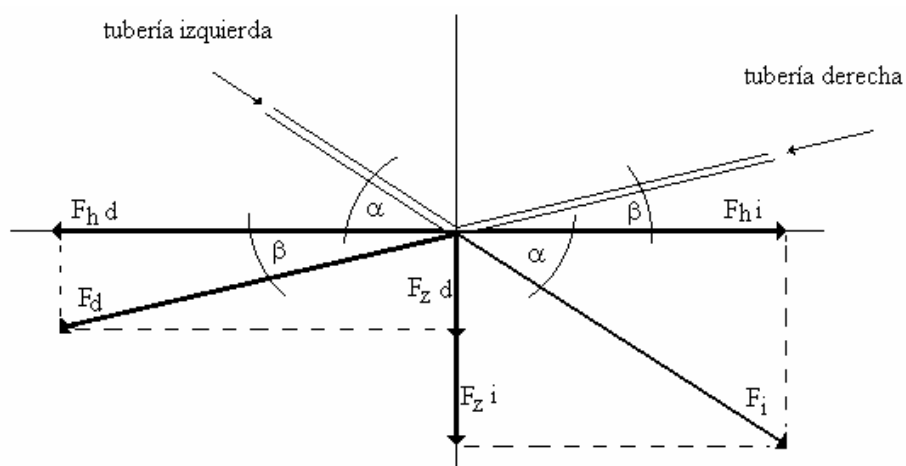


Fig. 3-3 Fuerzas actuantes en el anclaje, en el plano vertical.

En planta, las dos proyecciones horizontales no son colineales por lo que debería descomponerse según los ejes x e y según se muestra en la Fig. 3-4

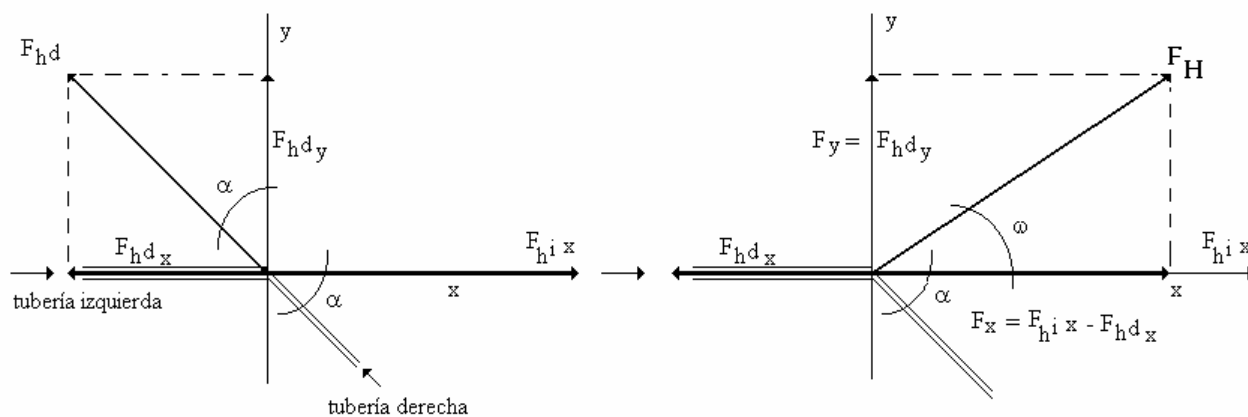


Fig. 3-4 Componentes de las fuerzas horizontales que actúan en el anclaje.

Las tuberías pueden colocarse en zanjas, por debajo del nivel de las calles, permitiendo la circulación de vehículos o sobre la superficie del terreno, en apoyos, cuando las condiciones lo permitan y esto no represente ningún obstáculo para la circulación de personas, vehículos o animales.

Las tuberías de PVC ó PEAD no se deben colocar sobre la superficie del terreno debido a que sufren daños por la acción de los rayos ultra violeta proveniente de las radiaciones solares y adicionalmente están expuestas a daños provocados por animales o personas inescrupulosas.

Las tuberías metálicas pueden ser colocadas en zanjas o sobre la superficie del terreno. En ambos casos deben ser limpiadas mediante métodos manuales o mecánicos con el fin de remover todo el oxido existente y finalmente protegerlas con pinturas asfálticas.

Colocación de tuberías en zanjas

La condición de zanja se define cuando el tubo se encuentra instalado en una zanja relativamente estrecha, cortada en el terreno natural y cubierta con relleno hasta la superficie.

En el caso de terrenos inestables se hace necesario la colocación de un entibado o apuntalamiento de las paredes laterales con el fin de garantizar la seguridad del trabajo, el personal, las estructuras e instalaciones adyacentes.

El terreno de relleno tiene la tendencia a asentarse con relación al terreno natural en el cual se ha excavado la zanja. Este movimiento o tendencia induce hacia arriba fuerzas cortantes las cuales soportan una parte del peso del relleno.

Los valores de ancho y profundidad indicados en la tabla 3-1 son los permitidos y pueden utilizarse con el fin de determinar los volúmenes de excavación y relleno, bien sean a mano o a máquina, en terreno normal, con peñones o en roca.

Diámetro mm	Ancho si entibado m	Ancho con entibado m	Profundidad m
900	1.50	1.80	
750	1.35	1.65	
600	1.20	1.50	1.65
500	1.10	1.40	1.60
400	1.00	1.30	1.55
300	0.80	1.00	1.30
250	0.70	1.00	1.20
200	1.60	0.90	1.00
150	0.60	0.90	0.90
100	1.60	0.90	0.75

Tabla 3-1 Anchos y profundidades de zanjas para tuberías de acero u otros materiales (no concreto)

El ancho de la zanja es tal que permita la entrada a esta del personal necesario para la correcta instalación de la tubería y de los accesorios, la forma puede cambiar dependiendo del tipo de terreno o de la profundidad, según se indicada en la Fig. 3-11.

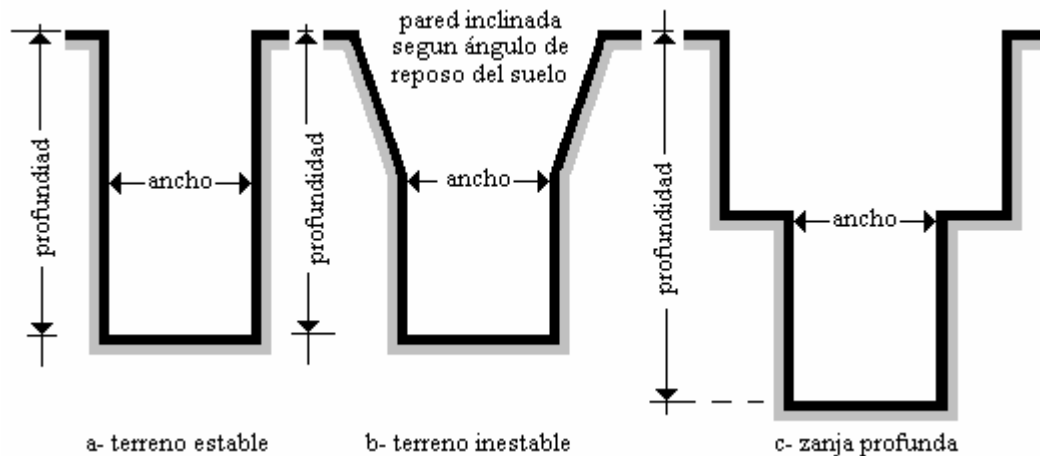


Fig. 3-11 Zanjas recomendadas, según el terreno y la profundidad.

La profundidad mínima de la zanja debe proteger a la tubería de los efectos de la carga producida por el peso del relleno o carga muerta y del peso de los vehículos o cargas vivas, así mismo la profundidad máxima se establece de manera que no se dificulten las labores de construcción, mantenimiento, reparación o la conexión de nuevos servicios.

En ocasiones especiales, las tuberías deben ser colocadas a profundidades menores o mayores que las recomendadas, en cuyos casos se deben tomar las precauciones necesarias para que no se produzcan daños por efecto de la carga viva y la carga muerta.

En estas ocasiones, generalmente las tuberías se protegen con concreto a su alrededor en la longitud que sea necesario. Estas precauciones suelen tomarse en las tuberías de policloruro de vinilo (PVC) y polietileno de alta densidad (PEAD) ya que en las más resistentes como las de acero (A), hierro fundido (HF), hierro fundido dúctil (HFD) no es necesario dicha protección.

El comportamiento de las tuberías bajo cargas será diferente si la tubería es rígida o flexible, en el caso de tuberías rígidas las cargas aplicadas son absorbidas completamente por el tubo mientras que las tuberías flexibles solo parte de la carga es soportada por la tubería. En este caso el tubo se deforma aumentando su diámetro horizontal, comprimiendo el terreno adyacente, y allí se genera una resistencia pasiva del suelo que contribuye a soportar las cargas. Se consideran tuberías flexibles aquellas que permiten deformaciones transversales de mas del 3% sin que haya fractura; por lo tanto las tuberías de PVC se consideran flexibles.

Relleno de la zanja

Después de colocar la tubería, se debe realizar el relleno de la zanja lo más pronto posible con el fin de evitar inundaciones por causas de las lluvias, deslizamiento de las paredes laterales y accidentes de vehículos o personas. Este relleno se realizará una vez concluída satisfactoriamente la prueba de presión de la tubería donde se verifique que no existen fugas en uniones ni accesorios.

En la Fig. 3-12 se indican las diferentes zonas que componen la sección transversal de una zanja las cuales deben ser consideradas para obtener un adecuado relleno en el que no existan asentamientos con el transcurrir del tiempo.

La fundación se realiza en aquellos casos en el que el terreno sea inestable y no pueda proporcionar un apoyo adecuado a la tubería, se debe excavar una profundidad adicional para luego rellenar con un material apropiado.

El colchón se utiliza generalmente en tuberías de PVC con el fin de garantizar un apoyo uniforme y adecuado a la tubería. Por lo general una capa de material fino entre 10 cm y 15 cm es suficiente.

El relleno lateral es sumamente importante, ya que afecta el comportamiento de la tubería y debe ser realizado cuidadosamente con pisones manuales o neumáticos.

El relleno inicial se realiza entre la línea media y una distancia de unos 15 cm a 30 cm por encima de la corona o parte superior del tubo. Para la realización de este relleno debe humedecer el material hasta obtener la humedad óptima ya que se debe alzar un 95 % de ensayo Proctor con el fin de evitar asentamientos de terreno y evitar daños en el pavimento.

El relleno final se realiza con material que no contenga rocas o escombros, la compactación el relleno debe ser realizado con equipo mecánico. En campo abierto, el relleno puede ser realizado sin compactación del material dejando que la densidad del material sea alcanzada por simple consolidación en el tiempo a menos que las especificaciones del proyecto indiquen lo contrario.

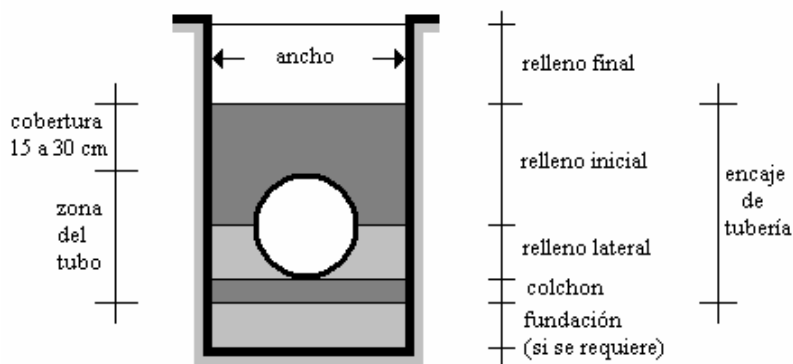


Fig. 3-12 Diferentes zonas de relleno en zanjas.

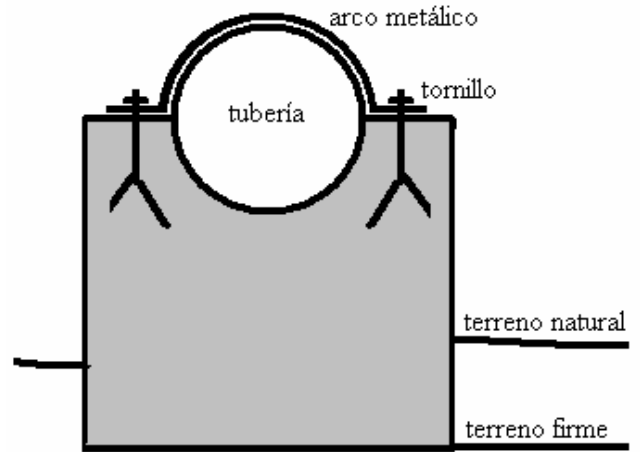
Colocación de tuberías sobre la superficie del terreno

Cuando se colocan tuberías en el campo, existe la posibilidad de que estas sean colocadas sobre la superficie del terreno, en este caso no se colocan directamente en el suelo sino sobre apoyos de los cuales existe una gran variedad pudiendo ser de concreto o metálicos. Estos apoyos son colocados generalmente con una separación de unos 6.00 m, y previamente debe verificarse que estructuralmente, la tubería soporta los esfuerzos que se generan.

Los apoyos de concreto deben estar asentados sobre terreno firme y generalmente tiene la forma indicada en la Fig. 3-13.



Acueducto Regional del Táchira



Esquema del apoyo

Fig. 3-13 Tubería colocada sobre apoyo de concreto.

Otra alternativa sería la de colocar la tubería es sobre soportes metálicos como se muestra en la Fig. 3-14.

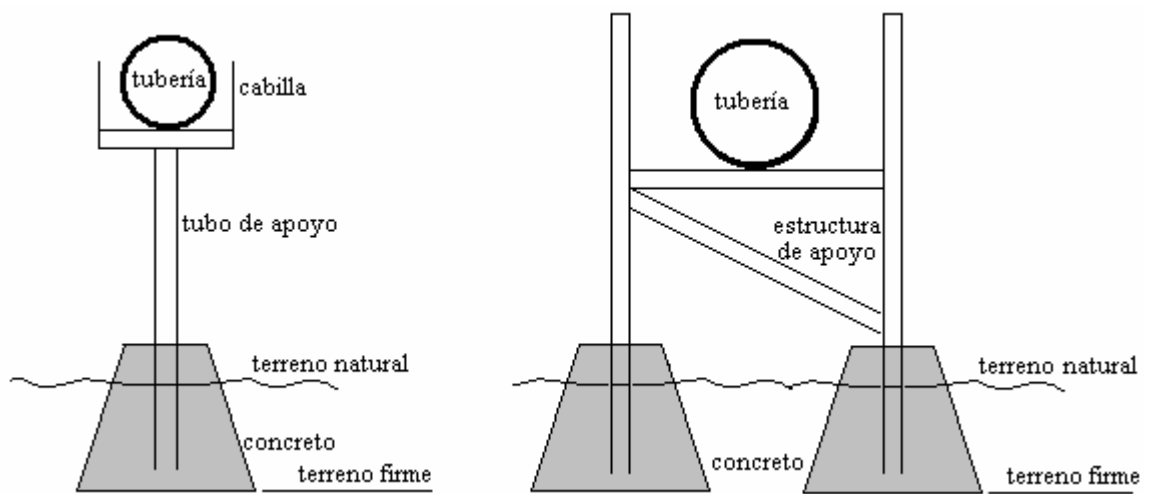


Fig. 3-14 tubería colocada sobre apoyo metálico.

Válvulas

Definición

Las válvulas son elementos que se instalan en las tuberías para la adecuada operación, seguridad, control o regulación del caudal y mantenimiento. Esto se hace al inicio, al final o en algún lugar intermedio del conducto.

En general las válvulas están formadas por el cuerpo, el obturador, el actuador, el mecanismo complementario y eventualmente un indicador de posición y sentido del movimiento.

El cuerpo es para alojar el elemento obturador propiamente dicho, esta diseñado de tal forma que permita una adecuada trayectoria del flujo y facilite las operaciones de reparación y mantenimiento.

El obturador es el elemento móvil cuya función es abrir, restringir o cerrar el paso del flujo.

El actuador es el conjunto de partes necesarias que modifican la posición del obturador desde la parte exterior.

Los mecanismos complementarios son aquellos que se requieren de acuerdo con el tipo de accionamiento seleccionado y pueden ser manuales, eléctricos o hidráulicos.

Las pérdidas de energía dependen del tipo de válvula y de su abertura, y vienen representadas por la expresión $k \frac{V^2}{2g}$. Estas pérdidas son suministradas por el fabricante.

Las válvulas para regulación funcionan bajo el principio de regulación del área de paso, las mejores son las de plato y las de paso anular. Otras también sirven, operando parcialmente cerradas; sin embargo, debe consultarse a los fabricantes sobre posible cavitación en esas condiciones de trabajo.

Debido a la gran variedad de válvulas que existen solamente se indicarán algunas características y debe consultarse al fabricante con el fin de obtener datos específicos.

Clasificación según su función:

Según este criterio las válvulas pueden agruparse en:

De paso

De regulación

Unidireccionales

De admisión y expulsión de aire

Para el vaciado de tuberías

De alivio

Válvulas de paso

Permanecen siempre totalmente abiertas, también son denominadas de reparación y permiten interrumpir la totalidad del flujo en el caso de reparaciones o mantenimiento, por ejemplo, las válvulas colocadas antes y después de las bombas las cuales al cerrarse permiten remover los equipos permitiendo el funcionamiento, de otras bombas colocadas en paralelo, sin que exista interrupción del flujo en el resto del sistema. En redes de distribución permiten cerrar un sector o ramal para así poder realizar reparaciones necesarias afectando solamente una pequeña parte de la red de distribución.

Válvulas Reguladoras

Tienen como función la regulación o el control de diversas magnitudes hidráulicas en los sistemas de conducción, principalmente la presión el caudal y los niveles de la superficie del agua en los tanques. Cuando controlan presiones o caudales generalmente lo hacen mediante la restricción local del área del flujo determinada por la posición de la parte móvil u obturador.

Las válvulas utilizadas con este propósito deben ser resistentes a los efectos de vibraciones y esfuerzos localizados.

Para controlar gastos en una aducción es recomendable el uso de válvulas tipo paso anular, de globo y las rotatorias (esfera y cono), con menor frecuencia las de mariposa y casi nunca las de compuerta.

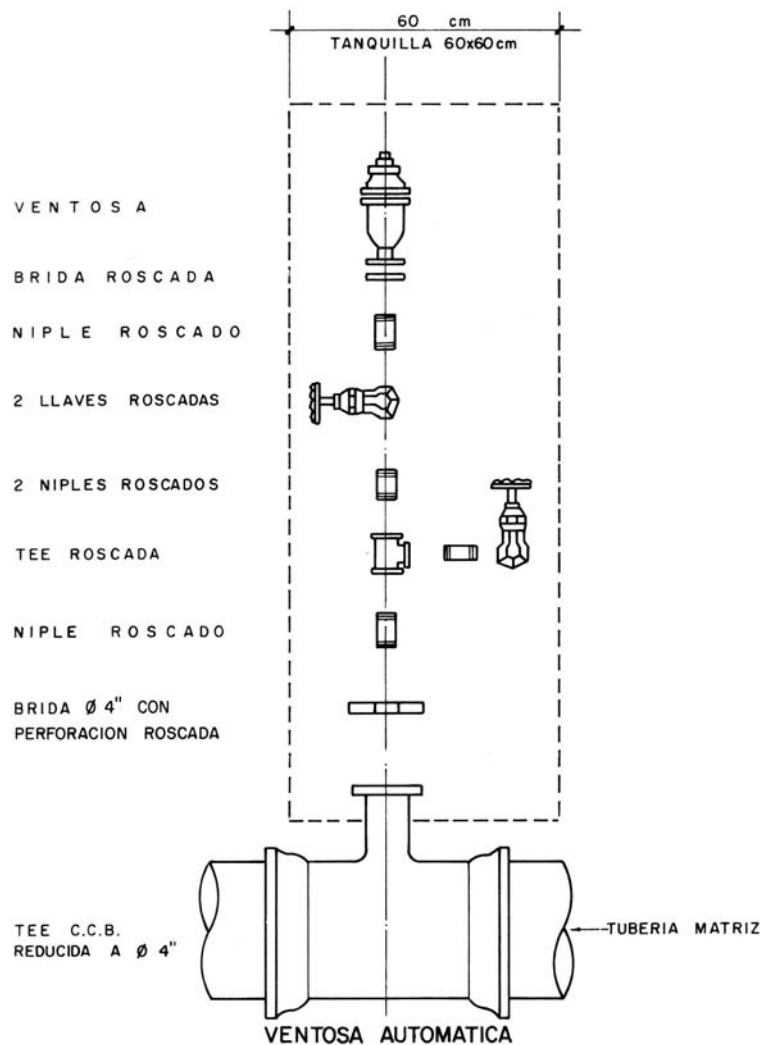
Válvulas unidireccionales

El diseño mecánico de estas válvulas es tal que solamente permiten que el flujo solamente sea en una dirección, las más comunes son las de clapeta basculante y las de pé. Se usan para impedir el vaciado de los tanques, para que las moto bombas no giren en sentido contrario cuando se suspenda o falle el suministro de energía eléctrica y para garantizar el cebado en las tuberías de succión en ciertas estaciones de bombeo cuando el nivel del agua se encuentra por debajo del eje de la bomba.

Válvulas de admisión y expulsión de aire

Estas válvulas son conocidas con el nombre de ventosas y permiten la entrada o salida de aire. Se colocan en las partes altas de las tuberías donde existan cambios de pendientes, en estos lugares el aire tiende a acumularse durante el llenado o cuando el agua queda en reposo, impidiendo el paso del agua al reducirse la sección de la misma, pudiendo producir adicionalmente pérdidas de energía las cuales en algunos casos pueden ser apreciables. Para evitar esto, la válvula permite la expulsión el aire.

En el caso de vaciado de la tubería permite la entrada de aire con el fin de evitar el colapso de la misma. En la Fig. 3-4 se muestra su instalación para tuberías desde 300 mm hasta 760 mm.



DESPIECES

ESC.: S/E

VENTOSA MANUAL	
TIPO A	TIPO B
PERFORAR EL TUBO	COLOCAR TEE
COLOCAR CORPORATION STOP	USAR LLAVE DE PASO

DIAMETRO DE LAS VENTOSAS

TUBERIA MATRIZ Ø		VENTOSA			
		MANUAL Ø		AUTOMATICA Ø	
PULG.	mm	PULG.	mm	PULG.	mm
12	300	4	100	3/4	20
14	350	4	100	3/4	20
16	400	6	150	1	25
18	450	6	150	1	25
20	500	6	150	2	50
24	600	8	200	2	50
30	760	8	200	2	50

Fig. 3 – 4 Instalación de Ventosas, según Harry Osers.

Válvulas para el vaciado de tuberías

En los puntos bajos de las tuberías, cuando existan cambios de la pendiente debemos colocar válvulas que permitan el vaciado de la tubería, con el fin de realizar labores de mantenimiento. Las válvulas comúnmente utilizadas para este fin son las de compuerta. En la Fig. 3-5 se muestra su instalación para tuberías desde 100 mm hasta 760 mm.

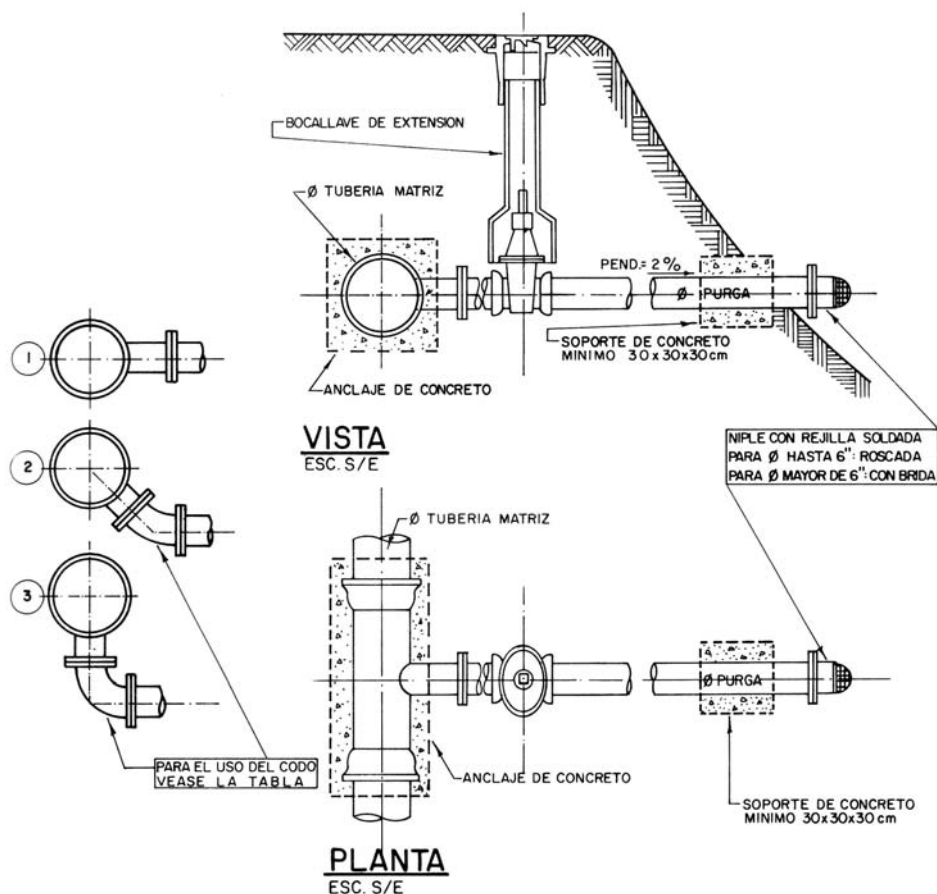


Fig. 3-5 Instalación de válvulas de purga, según Harry Osers.

Válvulas de alivio

Estas válvulas se utilizan con la finalidad de no permitir que la presión en el interior de una tubería sobrepase de un cierto valor, poseen un dispositivo de apertura que se acciona cuando esto ocurre.

Tipos de válvulas de uso común en acueductos

De compuerta o deslizantes
De mariposa
Cilíndricas, cónicas o esféricas
De paso anular, pistón o aguja
De plato
De retención, clapeta o check

Válvulas de compuerta o deslizantes

El elemento de cierre u obturador es una compuerta en forma circular cuyas caras pueden ser paralelas o en forma de cuña en el proceso de cierre la compuerta se mueve a través de ranuras existentes en el cuerpo de la válvula el obturador es accionado mediante un eje de transmisión rotatorio según se muestra en la Fig 3 -7.

Entre las características podemos citar:

1. Ofrecen poca resistencia al flujo cuando están totalmente abiertas.
1. Se emplean para diámetros pequeños.
3. La velocidad máxima admisible es de aproximadamente 15.00 m/s.
4. El coeficiente k varía entre 0.12 y 0.28 cuando están completamente abiertas, en otras condiciones de abertura el coeficiente k es variable, para obtener información adicional se debe consultar al fabricante.

Por ejemplo, una determinada fábrica indica los siguientes valores:

Para $D = 150 \text{ mm}$

e/D	0.95	0.90	0.80	0.70	0.60	0.50	0.40	0.30	0.20	0.00
k	850	215	47	16	7	3	1.70	1.05	0.68	0.12

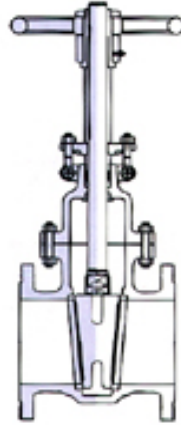


Fig.3 – 7 Válvula de compuerta.

Válvulas de mariposa

El elemento de cierre es un disco circular el cual gira alrededor de un eje generalmente ubicado en el plano horizontal, acoplado adecuadamente al mecanismo actuador. Generalmente resultan más livianas y pequeñas que las de compuerta, según se muestra en la Fig. 3 – 8.

Entre las características podemos citar:

1. Originan pérdidas de energía muy pequeña cuando están totalmente abiertas.
2. La compuerta tiene forma hidrodinámica con el fin de reducir la resistencia.
3. El disco es excéntrico para tener una mayor estabilidad a altas velocidades.
4. La velocidad máxima admisible es de aproximadamente 15.00 m/s., para velocidades superiores el disco genera vórtices alternados que inducen a vibraciones peligrosas destruyéndose los sellos de goma.

El coeficiente k es variable dependiendo del grado de abertura de la compuerta.

Por ejemplo, una determinada fábrica indica los siguientes valores:

ϕ°	5	15	25	35	45	55	70	90
K	0.24	0.90	2.51	6.22	18.70	58.80	751.00	

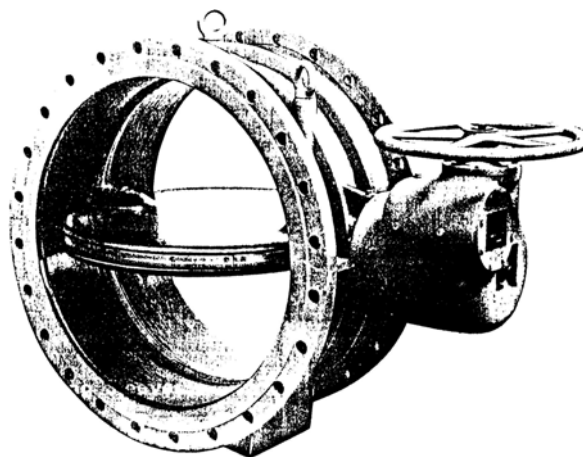


Fig. 3 - 8 Válvula de mariposa.

Válvulas cilíndricas, cónicas o esféricas

El elemento de cierre u obturador es de forma esférica o cónica con una perforación cilíndrica del mismo diámetro de la tubería. En posición totalmente abierta el área de paso es igual al de la tubería, según se muestra en la Fig. 3 – 9.

Entre las características podemos citar:

1. Totalmente abiertas no representan ningún obstáculo al flujo por lo que el valor de k es cero.
2. Son hidráulicamente perfectas pero de alto costo.
3. No tienen límite de velocidad.
4. Debido a su movimiento giratorio alrededor de un eje, se pueden abrir o cerrar con un esfuerzo relativamente pequeño, motivo por el cual se emplean en tuberías de gran diámetro y elevadas presiones.

El coeficiente k es variable, dependiendo del grado de abertura de la compuerta.

Por ejemplo, una determinada fábrica indica los siguientes valores:

ϕ°	0	10	20	30	40	50
K	0.00	0.29	1.56	5.17	17.30	526.00

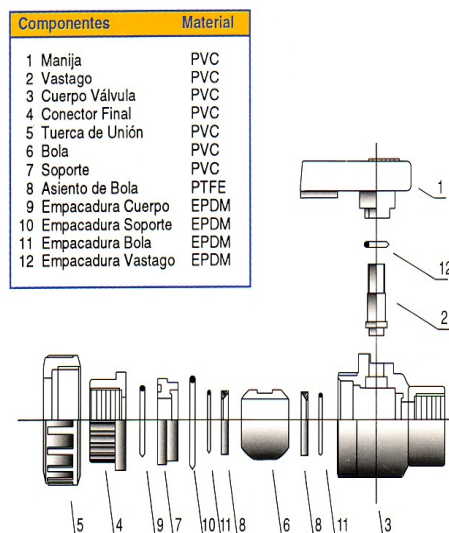


Fig.3 - 9 Foto de una válvula esférica y corte longitudinal.

Válvulas de paso anular, pistón o aguja

El obturador está constituido por un elemento suspendido en el interior de la válvula en forma de proyectil que transforma el flujo circular en un flujo anular, este elemento es de forma aerodinámica y es accionado por un vástago, generalmente roscado, cuyo movimiento es el mismo que la dirección del flujo, el cierre se realiza cuando el elemento obturador se apoya contra el asiento circular colocado en el cuerpo de la válvula, según se muestra en la Fig. 3 – 10.

Entre las características podemos citar:

1. Regulación del chorro en turbinas Pelton
2. Regulación del flujo en descargas de presas por operar a cualquier abertura
3. Operan satisfactoriamente con cargas hidráulicas elevadas
4. El coeficiente k varía entre 11.2 y 2.00 cuando están completamente abiertas, en otras condiciones de abertura el coeficiente k es variable, para obtener información adicional se debe consultar al fabricante.

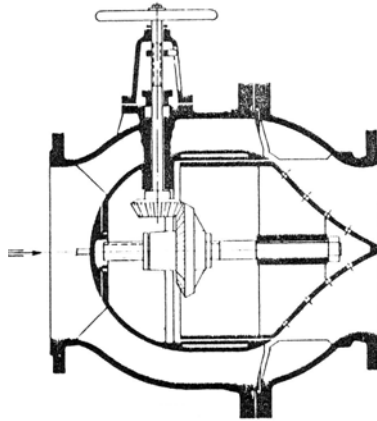


Fig. 3 - 10 Válvula de paso anular.

Válvulas de plato, globo o compresión

El elemento obturador es de forma circular unido a un vástago, generalmente roscado, el cual se mueve perpendicularmente al eje de la tubería. El cierre se realiza cuando el obturador se apoya contra el asiento circular colocado en el cuerpo de la válvula, según se muestra en la Fig. 3 – 11.

Entre las características podemos citar:

1. Se usan como válvula de cierre o de regulación.
2. El coeficiente k varía entre 0.60 y 4.00.
3. Tiene una flecha que indica la dirección del flujo.

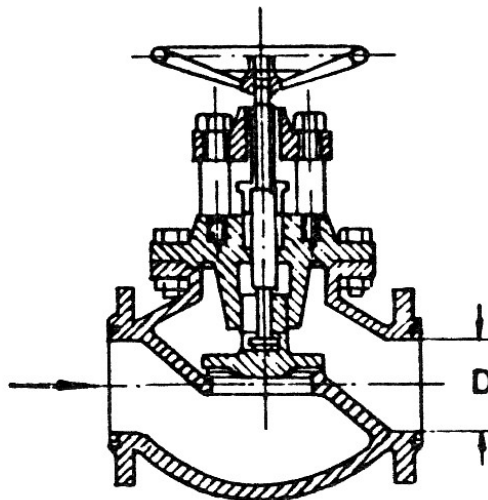


Fig 3 - 11 Válvula de plato.

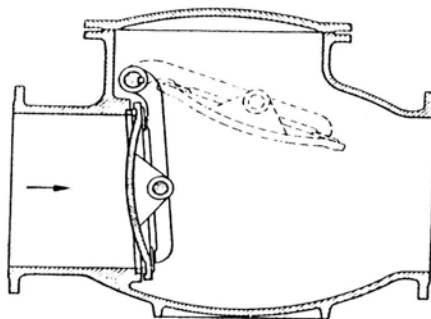
Válvula de retención, clapeta o check:

El elemento obturador es una placa circular, articulada al cuerpo de la válvula mediante un eje horizontal. Bajo condiciones normales de operación, el obturador es sostenido por la acción hidrodinámica del flujo. Una vez interrumpido el flujo el elemento obturador cae por su propio peso o ayudado por un contrapeso.

Se usa con la finalidad de impedir que el fluido circule en sentido contrario, impidiendo el vaciado de tanques y en grupos de bombeo la rotación en sentido contrario del equipo, lo cual no es permitido por restricciones electromecánicas.

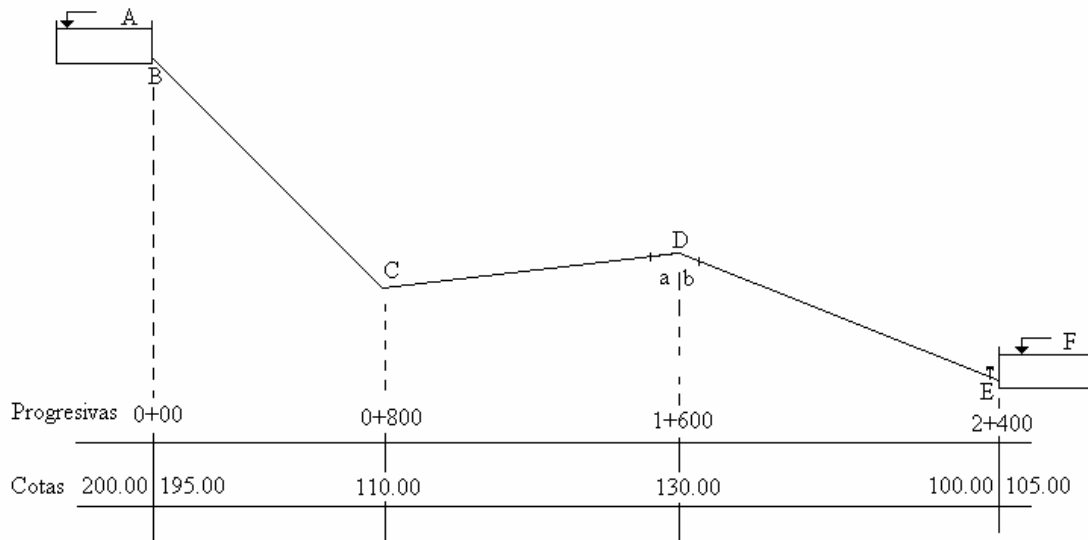
En tuberías de succión verticales las válvulas de retención son denominadas de pié y se usan para mantener la tubería llena de agua lo cual es conocido con el nombre de cebado.

En la Fig. 3 - 12 se muestra una válvula de retención.



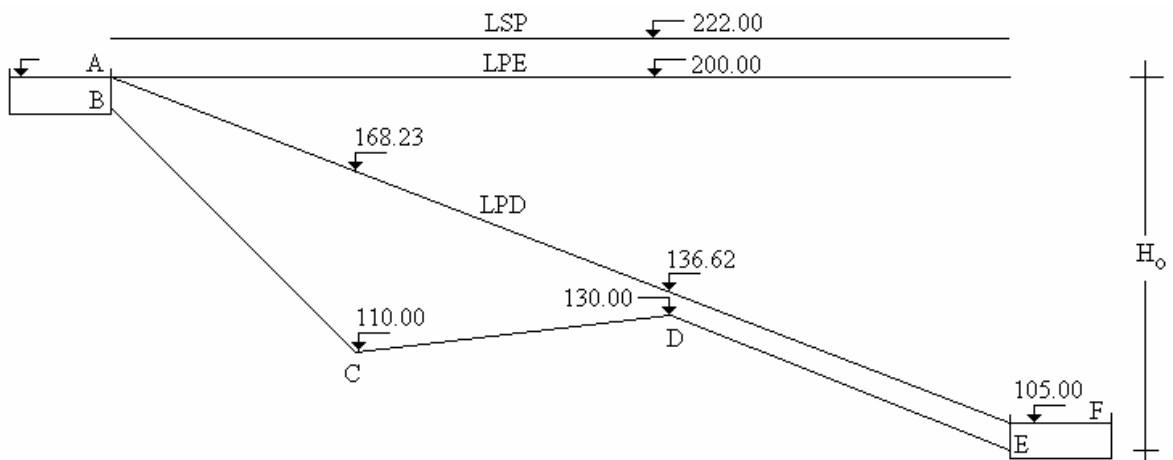
Ejemplo 3.1

Para la aducción por gravedad mostrada en el ejemplo 2.3, determinar las fuerzas necesarias para diseñar un anclaje en el cambio de alineación existente en el punto D, considerando solamente presión y peso propio, si adicionalmente se dispone de la siguiente información:



Distancia de las juntas de dilatación al punto D; $a = 40.00$ m y $B = 50.00$ m.
Asumir el peso propio de la tubería como 310 kg/ml.

Con los cálculos realizados en el ejemplo 2.3 se obtuvieron las líneas de: presión estática, presión dinámica y sobre presión mostradas en el siguiente esquema.



Determinación de las fuerzas, horizontal y vertical, para el diseño del anclaje en el punto D.

Fuerza por presión

En el esquema anterior se puede observar que la presión mas desfavorable corresponde a la producida por la línea de sobre presión

$$F = \gamma h A = 1000 (222.00 - 130.00) \frac{\pi}{4} (20 \times 2.54 \times 10^{-2})^2 = 18637.00 \text{ kg.}$$

Determinación de los ángulos de la tubería con respecto a la horizontal en el punto D

$$\text{Sen } \beta = \frac{\Delta z_2}{L_2} = \frac{130.00 - 110.00}{800.25} \Rightarrow \beta = 1.43^\circ$$

$$\text{Sen } \delta = \frac{\Delta z_3}{L_3} = \frac{130.00 - 100.00}{800.56} \Rightarrow \delta = 2.15^\circ$$

Fuerza por peso

$$F_1 = \text{pp a sen } \beta = 310.00 \times 40.00 \times \text{sen } 1.43^\circ = 310.00 \text{ kg.}$$

$$F_2 = \text{pp b sen } \delta = 310.00 \times 50.00 \times \text{sen } 2.15^\circ = 581.00 \text{ kg.}$$

Fuerzas producidas por la tubería de la izquierda y derecha

$$F_i = 18637.00 - 581.00 = 18056.00 \text{ kg}$$

$$F_d = 18637.00 - 310.00 = 18327.00 \text{ kg}$$

Fuerzas horizontales, en el eje x

$$F_{ix} = F \cos \beta = 18056.00 \cos 2.15^\circ = 18043.00 \text{ kg.}$$

$$F_{dx} = F \cos \delta = 18327.00 \cos 1.43^\circ = 18321.00 \text{ kg.}$$

Fuerzas verticales, en el eje z

$$F_{iz} = F \sin \beta = 18056.00 \sin 2.15^\circ = 677.00 \text{ kg.}$$

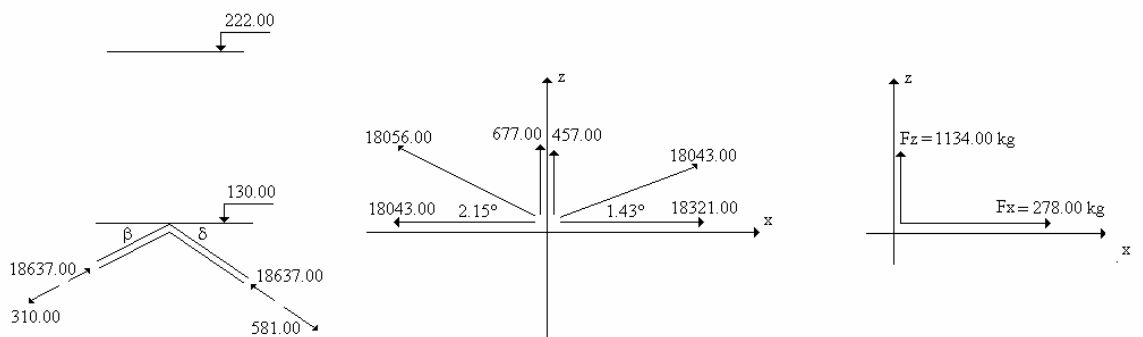
$$F_{dz} = F \sin \delta = 18327.00 \sin 1.43^\circ = 457.00 \text{ kg.}$$

Resultante de las fuerzas horizontales

$$F_x = 18321.00 - 18043.00 = 278.00 \text{ kg}$$

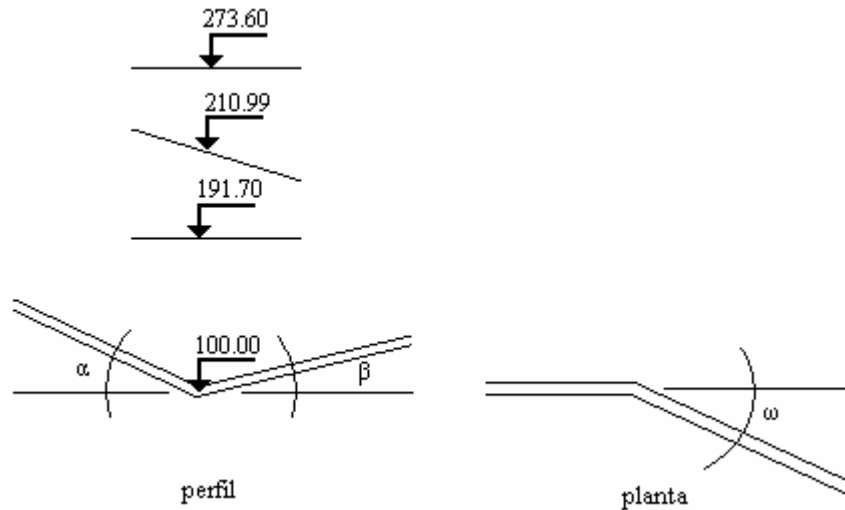
Resultante de las fuerzas verticales

$$F_z = 677.00 + 457.00 = 1134.00 \text{ kg}$$



Ejemplo 3.2

Para la el cambio de alineación de la tubería que se muestra en el esquema siguiente, determinar las fuerzas F_x , F_y , F_z necesarias para el diseño del anclaje.



Perfil y planta de tubería con cambio de dirección en ambos planos.

Adicionalmente se dispone de la siguiente información:

Diámetro de la tubería $\phi = 500$ mm

Espesor de la pared de la tubería $e = 17$ mm

Peso propio de la tubería $pp_1 = pp_2 = 181.8$ kg/m.

Distancia al apoyo más cercano, aguas arriba, $a = 6.00$ m.

Distancia al apoyo más cercano, aguas abajo, $b = 6.00$ m.

Longitud de la tubería, aguas arriba, hasta la junta de dilatación $l_1 = 20.00$ m.

Longitud de la tubería, aguas abajo, hasta la junta de dilatación $l_2 = 45.00$ m.

Caudal $Q = 186$ l/s.

Cota de la línea de presión estática = 191.7 m.

Cota de la línea de presión dinámica = 210.99 m.

Cota de la tubería en el cambio de alineación = 100.00 m.

Cota de la línea de sobrepresión = 273.60 m.

Angulo de inclinación de la tubería, aguas arriba, $\alpha = 21^\circ 42'$.

Angulo de inclinación de la tubería, aguas abajo, $\beta = 9^\circ 32' 24''$.

Cambio de dirección en planta $\omega = 30^\circ$.

Coefficiente de fricción en el apoyo $f = 0.42$

Coefficiente de fricción en la junta de dilatación $f_2 = 750$ kg/m.

Determinación de las fuerzas que actúan

Fuerza debida a la presión más desfavorable

Fuerza aguas arriba = Fuerza aguas abajo

$$F = \gamma \Delta h A_1 = \gamma \Delta h A_2$$

$$F = 1000 \times (273.60 - 100.00) \times \frac{\pi}{4} 0.500^2 = 34283 \text{ kg.}$$

Fuerza debida a la velocidad del agua

Fuerza aguas arriba = Fuerza aguas abajo

$$F = \frac{\gamma}{g} Q V_1 = \frac{\gamma}{g} Q V_2$$

$$F = \frac{1000}{9.81} 0.186 \left(\frac{0.186}{\frac{\pi}{4} 0.500^2} \right) = 18.00 \text{ kg}$$

Fuerza debida al peso de la tubería

Fuerza aguas arriba

$$F = pp_1 l_1 \sin \alpha = 181.8 \times 20.00 \times \sin 21.70^\circ = 1344.00 \text{ kg.}$$

Fuerza aguas abajo

$$F = pp_2 l_2 \sin \beta = 181.8 \times 45.00 \times \sin 9.54^\circ = 1356.00 \text{ kg.}$$

Fuerza debida a la fricción en el apoyo

Aguas arriba

$$F = f \cos \alpha \left(p p_1 l_1 + \gamma l_1 A_1 - \left(\frac{p p_1 + \gamma A_1}{2} \right) a \right)$$

$$F = 0.42 \cos 21.70 \left(181.8 \times 20 + 1000 \times 20 \times \left(\frac{\pi}{4} 0.5^2 \right) - \left(\frac{181.8 + 1000 \left(\frac{\pi}{4} 0.5^2 \right)}{2} \right) 6 \right) = 2506 \text{ kg}$$

Aguas abajo

$$F = 0.42 \cos 9.54 \left(181.8 \times 45 + 1000 \times 45 \times \left(\frac{\pi}{4} 0.5^2 \right) - \left(\frac{181.8 + 1000 \left(\frac{\pi}{4} 0.5^2 \right)}{2} \right) 6 \right) = 6571 \text{ kg}$$

Fuerza generadas en la junta de dilatación

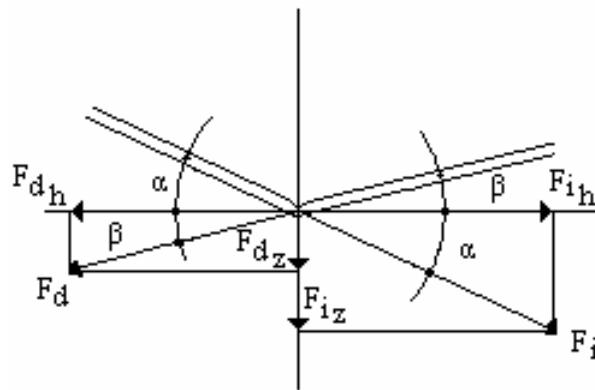
Por unir tuberías de igual diámetro las dilataciones generan fuerzas que se anulan.

La resultante de las fuerzas de la tubería de la derecha y de la izquierda son:

$$\Sigma F_i = 34224.00 + 18.00 + 1344.00 - 2506.00 = 33080.00 \text{ kg.}$$

$$\Sigma F_d = 34224.00 + 18.00 + 1356.00 - 6572.00 = 29026.00 \text{ kg.}$$

En el esquema siguiente se muestra un diagrama de las fuerzas F_d y F_i con sus proyecciones en el eje z y en el plano horizontal.



del esquema anterior, al proyectar estas fuerzas en el eje z se obtiene:

$$F_{iz} = F_i \sin \alpha = 33080.00 \sin 21.7^\circ = 12231.00 \text{ kg}$$

$$F_{dz} = F_d \sin \beta = 29026.00 \sin 9.54^\circ = \underline{4810.00} \text{ kg}$$

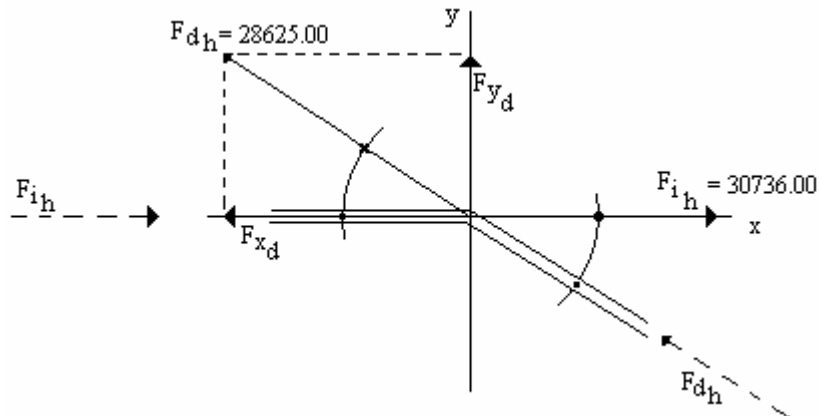
$$F_z = \quad \quad \quad = 17041.00 \text{ kg}$$

y al proyectarlas en el plano horizontal se obtiene:

$$F_{ih} = F_i \cos \alpha = 33080.00 \cos 21.7^\circ = 30736.00 \text{ kg}$$

$$F_{dh} = F_d \cos \beta = 29026.00 \cos 9.54^\circ = 28625.00 \text{ kg}$$

Las fuerzas calculadas no son colineales, por lo que en el plano horizontal el esquema es el siguiente:



$$F_{xd} = F_{dh} \cos 30^\circ = 28625.00 \cos 30^\circ = 24790.00 \text{ kg}$$

$$F_{yd} = F_{dh} \sin 30^\circ = 28625.00 \sin 30^\circ = 14312.00 \text{ kg}$$

$$F_x = F_{ih} - F_{xd} = 30736.00 - 24790.00 = 5946.00 \text{ kg}$$

El resumen de las fuerzas para el diseño del anclaje son:

$F_x = 5946.00 \text{ kg}$	$F_y = 14312.00 \text{ kg}$	$F_z = 17041.00 \text{ kg}$
--	---	---

Capítulo 4

Bombas

Generalidades

En algunos sistemas de conductos cerrados (tuberías) es necesaria la instalación de equipos de bombeo con el fin de vencer las pérdidas de energía y/o los desniveles existentes con el fin de enviar el caudal deseado. Las motobombas o bombas le suministran energía al fluido para que este fluya desde el lugar de origen hasta el destino, el cual, generalmente se encuentra a una cota superior.

En el diseño de sistemas de bombeo se debe estar en capacidad de escoger la bomba más adecuada y el número de unidades necesarias con el fin de enviar el agua de una manera eficiente y económica

Estos equipos están formados por un motor acoplado a la bomba propiamente dicha.

El motor puede ser de combustión (funcionando con gasolina o gasoil) o eléctrico, funcionado con corriente monofásica, bifásica o trifásica y girando a diferentes revoluciones por minuto (rpm) como, por ejemplo, 1750 rpm, 2400 rpm, 3400 rpm, etc.

La bomba es la máquina que le transfiere la energía proveniente del motor al líquido. Existen diferentes tipos de bombas y se pueden clasificar desde diferentes puntos de vista. Desde el punto de vista operativo se clasifican en:

- Bombas de émbolo
- Bombas centrífugas
- Bombas especiales

Bombas de émbolo

En este caso el fluido es desplazado por mecanismos tales como émbolos o pistones los cuales se mueven en el interior de una cavidad cilíndrica mediante acción manual, mecanismos movidos por el viento o motor, ejerciendo una fuerza directamente sobre el fluido. Son adecuadas para caudales pequeños, en este grupo se encuentran las aspirantes, las impelentes y las aspirantes – impelentes, en la fig. 4-1 se muestra un esquema de los diferentes tipos.

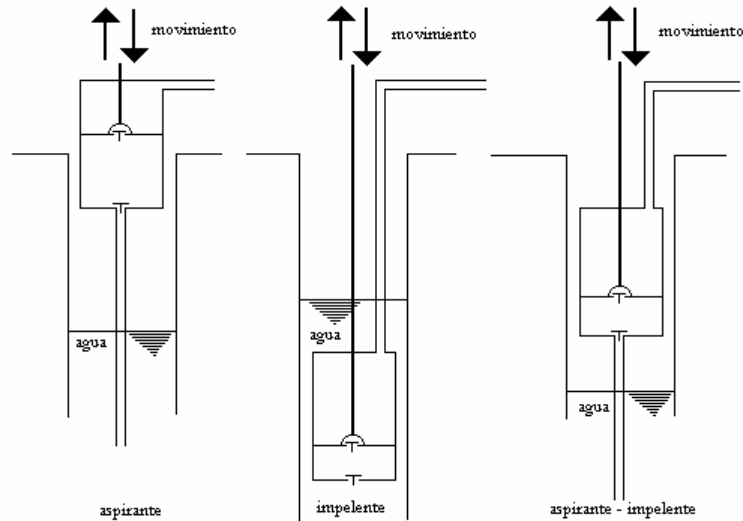


Fig. 4-1 Esquema de bombas de embolo.

Bombas centrífugas

Están formadas por una caja exterior o carcasa la cual aloja, en su interior, unas paletas o alabes montadas sobre una rueda formando el rodete, este gira apoyado en un eje conectado al motor. El agua entra por el ojo del rodete proveniente de la tubería de succión, pasa a través de los álabes y sale por la tubería de descarga con una energía mayor que con la que entró, en la Fig. 4-2 se muestra un esquema diferentes bombas centrífugas.

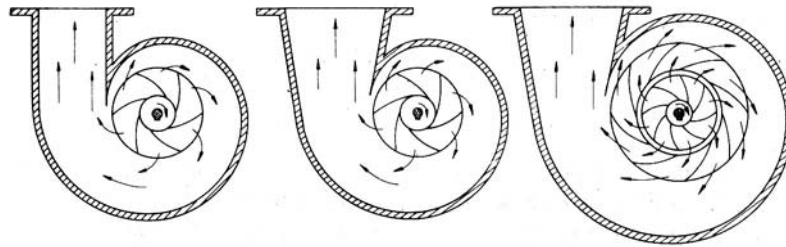


Fig. 4-2 Esquema de una bomba centrífuga

Desde el punto de vista de la forma del rotor las bombas se clasifican en:

Axiales, si la forma del rotor es tal que el agua es desviada 90° de la dirección de llegada, el rotor puede ser abierto o cerrado.

Mixtas, si la forma del rotor es tal que el agua es desviada un ángulo diferente a 90° de la dirección de llegada.

Axiales o de hélice, si la forma del rotor es tal que el agua no es desviada de la dirección de llegada.

Curvas características

El comportamiento de las bombas se representa mediante curvas propias de cada una de ellas, denominadas curvas características, donde se muestra su comportamiento, estas deben ser suministradas por el fabricante, y existe una gran variedad de presentación, entre las más usuales tenemos:

1. Para velocidad de rotación del motor constante:

Altura de bombeo, eficiencia o rendimiento y potencia consumida en función del caudal según se muestra en la Fig. 4-3.

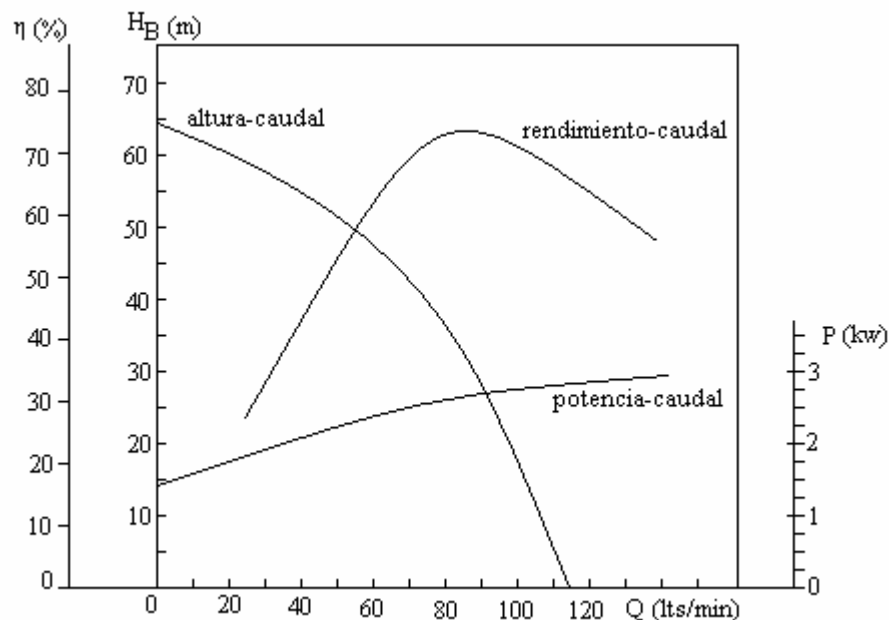


Fig. 4-3 Curvas características de una bomba en función del caudal.

2. Para velocidad de rotación variable:

Altura de bombeo, potencia consumida, caudal, eficiencia o rendimiento en función de la velocidad de rotación, según se muestra en la Fig. 4-4.

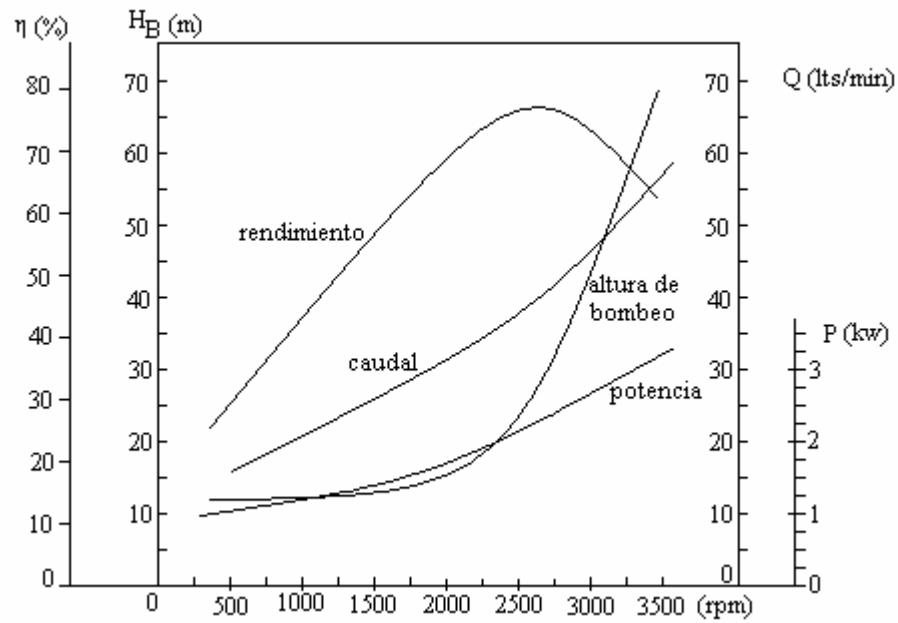


Fig. 4-4 Curvas características de una bomba en función de la velocidad de rotación.

Altura de bombeo, velocidad de rotación, y eficiencia o rendimiento en función del caudal, según se muestra en la fig. 4-5.

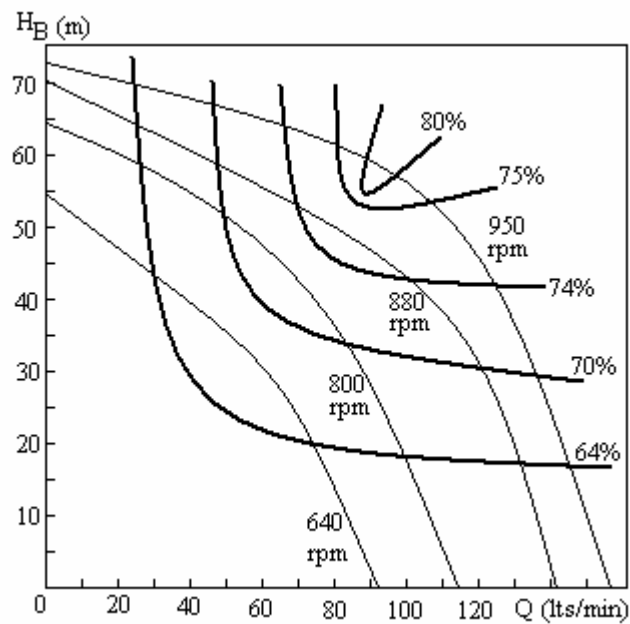


Fig. 4-5 Curvas características de una bomba en función del caudal.

Altura de bombeo, eficiencia o rendimiento, potencia consumida, altura neta de succión positiva (NPSH) las siglas anteriores se toman del significado de la expresión en inglés Net Positive Suction Head, para diferentes rodetes en función del caudal, según se muestra en la Fig. 4-6.

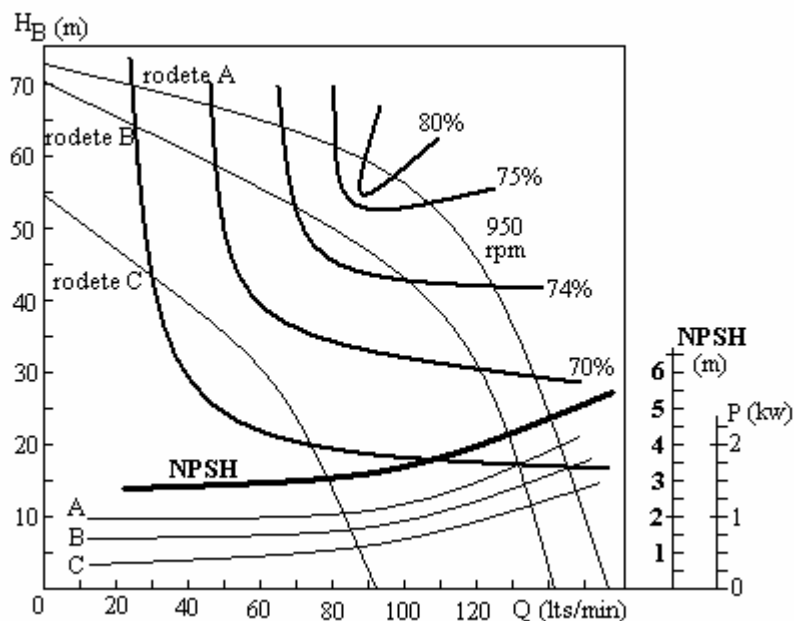


Fig. 5-6 Curvas características de una bomba en función del caudal.

La obtención práctica de la curva altura bombeo en función del caudal se puede obtener experimentalmente en un banco de pruebas. Para esto se instalan manómetros en la entrada y salida de la bomba como se indica en la Fig. 4-7.

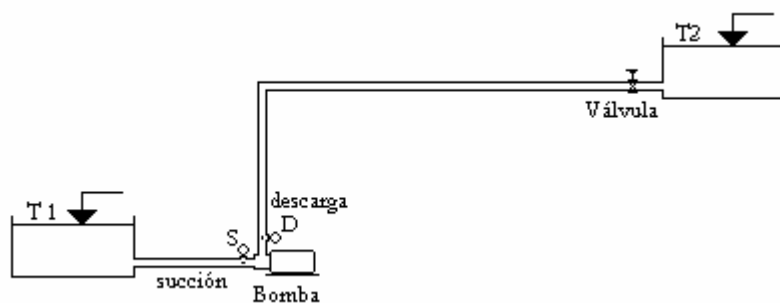


Fig. 4-7 Bombas en banco de prueba.

Aplicando la ecuación de Bernoulli entre el punto de succión, antes de la bomba y el punto de descarga, después de la bomba se tiene:

$$\frac{P_S}{\gamma} + \frac{V_S^2}{2g} + Z_S + H_B = \frac{P_D}{\gamma} + \frac{V_D^2}{2g} + Z_D \quad \text{ec. 4.1}$$

al despejar se obtiene:

$$H_B = \left(\frac{P_D - P_S}{\gamma} \right) + \left(\frac{V_D^2 - V_S^2}{2g} \right) + (Z_D - Z_S) \quad \text{ec. 4.2}$$

La diferencia de cotas entre la entrada y la salida es insignificante en comparación con las presiones generadas y si los diámetros en la succión y la descarga son iguales la diferencia de velocidades es cero y la altura de bombeo puede expresarse como:

$$H_B = \frac{P_D}{\gamma} - \frac{P_S}{\gamma} \quad \text{ec. 4.3}$$

Variando el punto de operación de la bomba, mediante el cierre o abertura de la válvula, se pueden hallar los pares de puntos (H_B , Q) que determinan la curva característica altura de bombeo en función del caudal, la cual corresponde a una velocidad de rotación constante del motor.

La obtención práctica de la curva potencia que la bomba recibe en el eje de entrada P_{bom} en función del caudal se puede obtener experimentalmente en un banco de pruebas, para ello se debe disponer de un medidor de torque en el eje, el cual puede ser un freno de Prony o un dinamómetro de torsión y de un tacómetro para medir la velocidad de giro, así conocido el momento en el eje M_e y la velocidad de giro ω se calcula la potencia de accionamiento mediante la ecuación 5.6

$$P_{\text{bom}} = M_e \omega \quad \text{ec. 4.4}$$

La potencia hidráulica (P) entregada al fluido, es el trabajo por unidad de tiempo que recibe el fluido para elevar un peso por unidad de tiempo ($Q\gamma$) una altura (H_B); es decir,

$$P = \frac{\text{Trabajo}}{\text{tiempo}} = \frac{\text{Fuerza o peso} \times \text{altura}}{\text{tiempo}}$$

$$P = Q\gamma H_B \quad \text{ec. 4.5}$$

donde

P es la potencia que recibe el fluido en kg.m/s
 Q es el caudal que circula por el sistema en m³/s
 γ es el peso específico del fluido en kg/m³
 H_B es la altura de bombeo en metros

Algunos factores de conversión de unidades de potencia son los siguientes:

1 CV (caballo de vapor) = 75 kg.m/s

1 HP (caballo de fuerza) = 76 kg.m/s

1 KW (kilovatio) = 102 kg.m/s

1 HP = 746 w

así, el rendimiento η de la bomba es:

$$\eta(\%) = \frac{P}{P_{\text{bom}}} 100 \quad \text{ec.4.6}$$

donde

η es el rendimiento de la bomba en porcentaje

La potencia eléctrica que recibe el motor, podría medirse a partir de la energía eléctrica y el tiempo necesario en consumir dicha energía como:

$$P_{\text{mot}} = \frac{E(\text{kw} - \text{h})}{t(\text{h})} \quad \text{ec. 4.7}$$

donde

P_{mot} es potencia eléctrica que recibe el motor en kw
 E es la energía eléctrica suministrada en kw-h
 t es el tiempo en el que se consume esa energía en horas

o también podría medirse la potencia eléctrica que recibe el motor con la utilización de un vatímetro instalado como se muestra en la Fig. 4-8.

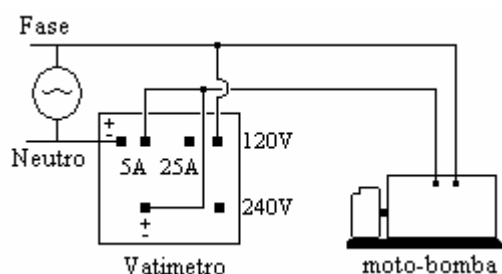


Fig. 4-8 Esquema de instalación y foto de un vatímetro.

y el rendimiento total del equipo motobomba es:

$$\eta_1(\%) = \frac{P}{P_{mot}} 100 \quad \text{ec. 4.8}$$

donde

η_1 es el rendimiento del conjunto motobomba en porcentaje.

En el capítulo 5 se muestra la determinación práctica de las curvas de altura de bombeo, potencia y rendimiento para una bomba instalada en el banco de prueba.

Análisis dimensional y leyes de semejanza

No siempre las curvas características elaboradas por el fabricante cumplen con las condiciones deseadas, de manera que se hace necesario modificar sus características y lograr un equipo más apropiado técnica y económicamente cambiando la velocidad de rotación del motor o el diámetro del rodete.

Análisis dimensional

Las variables que intervienen en el flujo a través de bombas pueden englobarse dentro de dos grupos.

1. Variables relativas a las bombas: las cuales están representadas por el caudal Q , la altura de bombeo H_B , el diámetro del rodete D , la velocidad de giro en rpm N , la potencia P y el rendimiento η .
2. Variables relativas al fluido: las cuales están representadas por la densidad ρ , y la viscosidad dinámica μ .

Para el análisis dimensional en base al teorema π es necesario definir las variables dependientes, independientes y de repetición, según Alarcón, la escogencia adecuada es la siguiente:

Variables dependientes: H, η, ρ

Variable independiente: Q, N, D, ρ, μ

Variable de repetición: N, D, ρ

La altura de bombeo H_B , representa en realidad un término de energía y no de longitud, por lo tanto, para tomar en cuenta su verdadero significado físico se usa el producto gH como variable global de altura de bombeo la cual representa la energía por unidad de masa. Una vez aplicado el teorema π se obtienen los siguientes números adimensionales:

$$\pi_1 = \frac{Q}{ND^3} \quad \text{Coeficiente de caudal}$$

$$\pi_2 = \frac{gH}{N^2 D^2} \quad \text{Coeficiente de altura}$$

$$\pi_3 = \frac{P}{\rho N^3 D^5} \quad \text{Coeficiente de potencia}$$

$$\pi_4 = \frac{\mu}{\rho D^2 N} \quad \text{Número de Reynolds}$$

$$\pi_5 = \eta \quad \text{Rendimiento}$$

Leyes de semejanza

La semejanza hidráulica se obtiene cuando los números adimensionales representativos de un fenómeno de flujo tienen los mismos valores aunque varíen los valores individuales de las variables que intervienen, para obtener una semejanza total se debe cumplir:

1. Similitud geométrica: proporcionalidad total entre las dimensiones de las bombas.
2. Similitud cinemática: los triángulos de velocidades de las bombas son proporcionales; es decir, los efectos de inercia son idénticos.
3. Similitud dinámica: todas las fuerzas son proporcionales en los diferentes puntos considerados, es decir, los números de Reynolds son idénticos.

Para un diámetro constante ($D_1 = D_2$) y una velocidad de rotación variable ($N_1 \neq N_2$), se tiene:

$$1.^{\text{ra}} \text{ ley } \left(\frac{Q}{ND^3} \right)_1 = \left(\frac{Q}{ND^3} \right)_2 \quad \text{como } D_1 = D_2 \quad \text{entonces} \quad \left(\frac{Q}{N} \right)_1 = \left(\frac{Q}{N} \right)_2 \quad \text{ec.4.9}$$

$$2.^{\text{da}} \text{ ley } \left(\frac{gH}{N^2 D^2} \right)_1 = \left(\frac{gH}{N^2 D^2} \right)_2 \quad \text{como } D_1 = D_2 \text{ y } g_1 = g_2 \quad \text{entonces} \quad \left(\frac{H}{N^2} \right)_1 = \left(\frac{H}{N^2} \right)_2 \quad \text{ec.4.10}$$

$$3.^{\text{ra}} \text{ ley } \left(\frac{P}{\rho N^3 D^5} \right)_1 = \left(\frac{P}{\rho N^3 D^5} \right)_2 \quad \text{como } D_1 = D_2 \text{ y } \rho_1 = \rho_2 \quad \text{entonces} \quad \left(\frac{P}{N^3} \right)_1 = \left(\frac{P}{N^3} \right)_2 \quad \text{ec. 4.11}$$

Las bombas no trabajan a velocidades de rotación arbitrarias y al estar acopladas a estos giran a la misma velocidad los motores eléctricos los son fabricados para que giren a ciertas velocidades predeterminadas las cuales dependen del número de polos y de la frecuencia.

Para una velocidad constante ($N_1 = N_2$) y un diámetro variable ($D_1 \neq D_2$), se tiene:

$$1.^{\text{ra}} \text{ ley } \left(\frac{Q}{ND^3} \right)_1 = \left(\frac{Q}{ND^3} \right)_2 \quad \text{como } N_1 = N_2 \quad \text{entonces} \quad \left(\frac{Q}{D^3} \right)_1 = \left(\frac{Q}{D^3} \right)_2 \quad \text{ec.4.12}$$

$$2.^{\text{da}} \text{ ley } \left(\frac{gH}{N^2 D^2} \right)_1 = \left(\frac{gH}{N^2 D^2} \right)_2 \quad \text{como } N_1 = N_2 \text{ y } g_1 = g_2 \quad \text{entonces} \quad \left(\frac{H}{D^2} \right)_1 = \left(\frac{H}{D^2} \right)_2 \quad \text{ec.4.13}$$

$$3.^{\text{ra}} \text{ ley } \left(\frac{P}{\rho N^3 D^5} \right)_1 = \left(\frac{P}{\rho N^3 D^5} \right)_2 \quad \text{como } N_1 = N_2 \text{ y } \rho_1 = \rho_2 \quad \text{entonces} \quad \left(\frac{P}{D^5} \right)_1 = \left(\frac{P}{D^5} \right)_2 \quad \text{ec. 4.14}$$

Bombas en sistemas de tuberías

En la práctica cuando se desea enviar agua desde un tanque T-1 colocado a una determinada cota hacia otro tanque T-2 colocado a una cota superior se hace necesario la instalación de un equipo de bombeo entre ambos tanques con el fin de que este le añada energía al fluido para que fluya desde el tanque inferior hacia el superior. En la Fig. 4-9 se muestra dicha instalación con su correspondiente línea de energía.

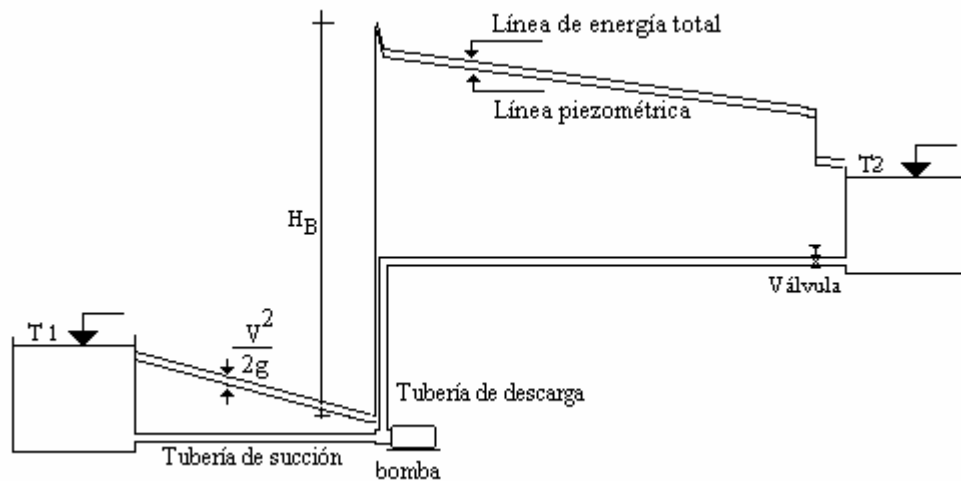


Fig. 4-9 Línea de energía en sistema de tubería con bomba.

Aplicando la ecuación de Bernoulli entre las superficies de los tanques T1 y T2 se tiene:

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 + H_B = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + \sum h_f + \sum h_m \quad \text{ec. 4.15}$$

donde

$\frac{p_1}{\gamma}, \frac{p_2}{\gamma}$ las presiones en las superficies de los tanques T1 y T2, que por ser la atmosférica son cero respectivamente.

$\frac{V_1^2}{2g}, \frac{V_2^2}{2g}$ las alturas de velocidades en la superficie de los tanques T1 y T2 que por ser de grandes dimensiones se consideran cero.

Z_1, Z_2 las cota topográficas de los respectivos tanques.

$\sum h_f$ sumatoria de las pérdidas por fricción.

$\sum h_m$ sumatoria de las pérdidas concentradas en, salida del tanque T1, codo, válvula, llegada al tanque T2.

Al despejar H_B de la ec. 4.15 se tiene:

$$H_B = Z_2 - Z_1 + \sum h_f + \sum h_m \quad \text{ec. 4.16}$$

la cual se puede escribir en función del caudal como:

$$H_B = Z_2 - Z_1 + \alpha L Q^2 + \left(\sum k_m \right) \frac{Q^2}{2g} \quad \text{ec. 4.17}$$

La ecuación anterior indica que la altura de bombeo, H_B , aumenta con el cuadrado del caudal, la forma final de la ecuación depende de las condiciones físicas de la instalación (longitud, codos, reducciones, válvulas, diámetro, rugosidad, etc). Para construir la curva del sistema se seleccionan una serie de valores de Q y se determinan los valores de H_B , con estos pares de puntos se grafica la curva del sistema, la cual tiene una forma general como la que se indica en la Fig. 4-10

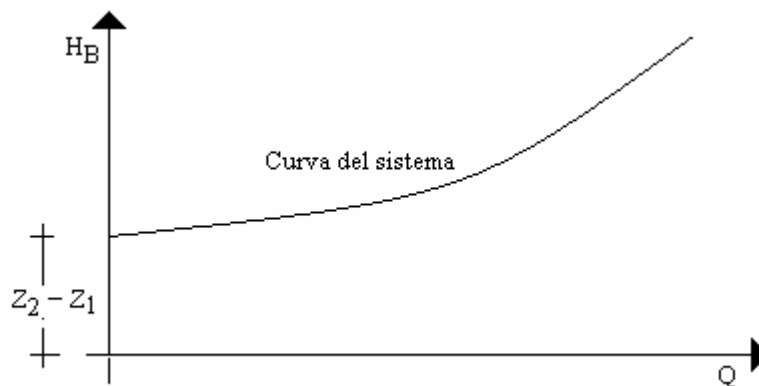


Fig. 4-10 Curva de un sistema de tubería con bomba.

Punto de operación de la bomba

Una vez construida la curva del sistema y la de la bomba, (altura – caudal), se grafican ambas en un mismo papel y el punto de corte corresponde al punto de funcionamiento; es decir, la bomba envía un caudal Q_0 y suministra una altura de bombeo de H_{B0} , como se muestra en la Fig 4.11.

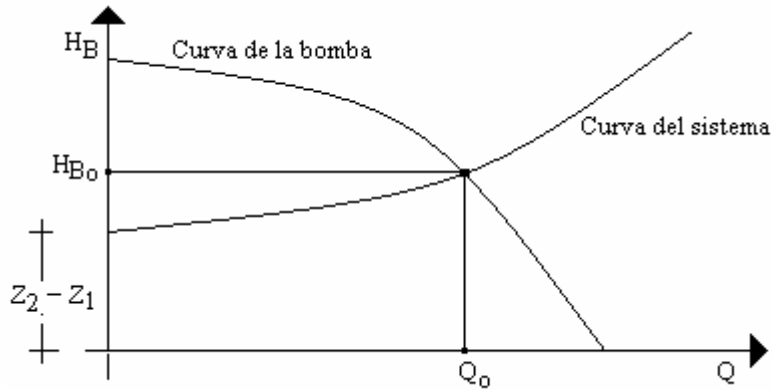


Fig. 4-11 Punto de operación del sistema.

En algunos casos, tales como tanques de bombeo, plantas de tratamiento, embalses, por condiciones topográficas, económicas o de inundación, la bomba no es posible colocarla por debajo de la superficie del agua y se debe colocar por encima dicha superficie, presentando limitaciones con la carga de succión, como en la Fig. 4-12 se muestra un esquema de dicha instalación.

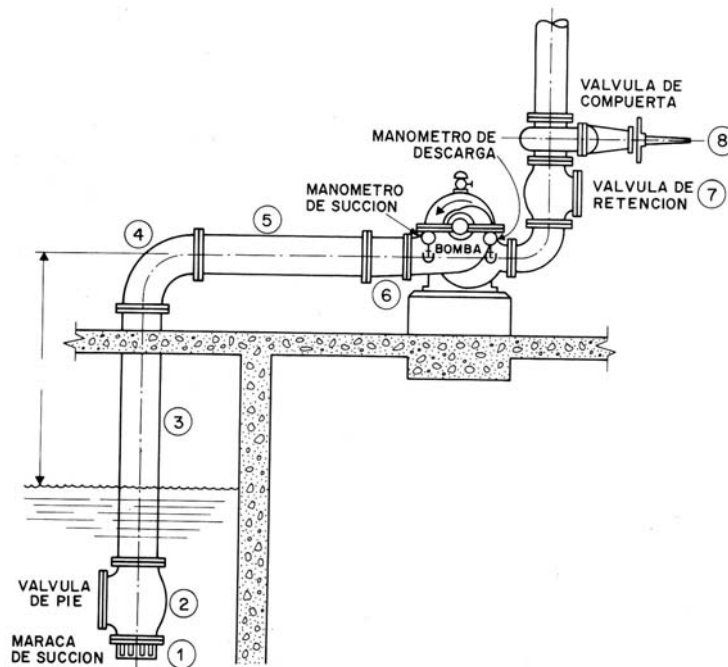


Fig. 4.12 Esquema de instalación con bomba sobre la superficie del agua.

donde:

1. Maraca o rejilla con el fin de evitar la entrada de material sólido a la tubería

- 126

donde

$\frac{P_{atm}}{\gamma}$ es la altura de presión atmosférica local en metros de agua.

$\frac{V_1^2}{2g}$ es la altura de velocidad en metros de agua en la superficie del tanque, considerada cero por ser un tanque de grandes dimensiones.

z_1 es la cota de la superficie del tanque, en el presente caso asumida cero.

$\frac{P_{s(abs)}}{\gamma}$ es la presión en la sección de entrada (absoluta) expresada en metros.

$\frac{V_s^2}{2g}$ es la altura de velocidad, en metros de agua, en la sección de entrada o succión de la bomba.

z_2 es la cota de la sección de entrada o succión de la bomba, en metros.

$\sum h_f$ es la sumatoria de todas las pérdidas por fricción, entre la rejilla de protección y la entrada de la bomba, en metros.

$\sum h_m$ es la sumatoria de todas las pérdidas menores de los accesorios que se encuentran instalados entre la rejilla de entrada y la sección de succión en metros.

al sustituir los valores indicados anteriormente se tiene:

$$\frac{P_{atm}}{\gamma} + 0 + 0 = \frac{P_v}{\gamma} + NPSH + z_s + \sum h_f + \sum h_m \quad \text{ec. 4-19}$$

$\frac{P_v}{\gamma}$ es la presión de vapor del agua (absoluta) expresada en metros.

Si se despeja NPSH se tiene:

$$NPSH = \frac{P_{atm}}{\gamma} - \frac{P_v}{\gamma} - z_s - (\sum h_f + \sum h_m) \quad \text{ec 4-20}$$

y si se despeja la cota de la bomba, z_s , se tiene, para un valor de NPSH, recomendado por el fabricante

$$Z_2 = \frac{P_{atm}}{\gamma} - \frac{P_v}{\gamma} - NPSH - (\sum h_f + \sum h_m) \quad \text{ec.4.21}$$

Bombas en serie

En el caso de existir alturas de bombeo mayores que las aportadas por una determinada bomba se podrían colocar dos o más bombas en serie (una a continuación de la otra) con la finalidad de vencer la altura indicada anteriormente, según se muestra en el esquema de la Fig 4-14

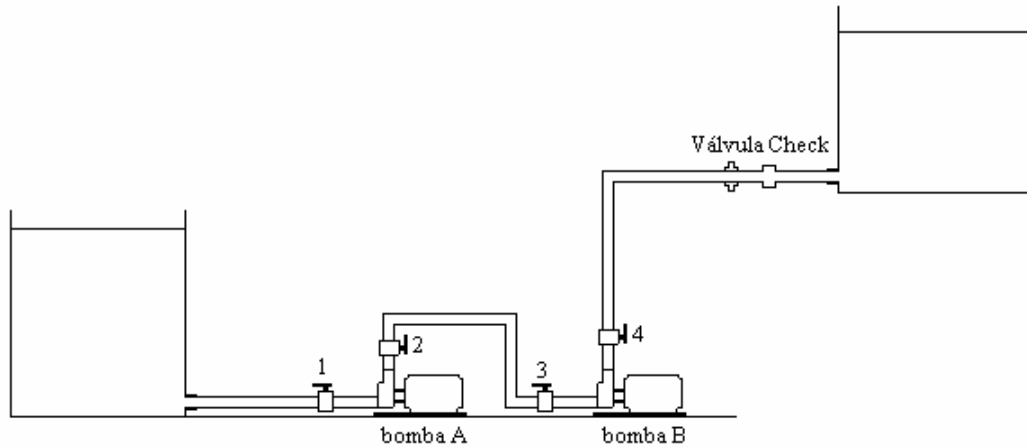


Fig. 4-14 Esquema de instalación de bombas en serie.

Para obtener la curva característica combinada, de altura – caudal ($H - Q$), para cada caudal se suman las alturas de cada bomba. En el caso de tener dos bombas idénticas las alturas serán el doble, en la Fig. 4-15 se muestra un esquema de la curva de dos bombas idénticas y la curva combinada ($A+B$)

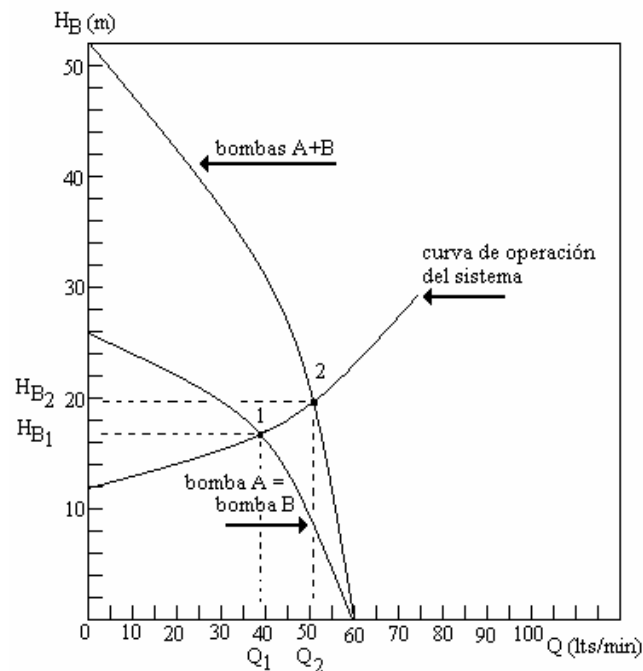


Fig. 4-15 Curva altura – caudal, para bombas idénticas y bombas en serie.

En el esquema anterior se puede observar que la curva de operación del sistema corta la curvas de las bombas en los puntos 1 y 2, si solamente trabaja una bomba, esta enviaría un caudal Q_1 y le suministraría al agua una altura de bombeo H_{B2} , si trabajan las dos bombas, como es el caso de bombas en serie, estas enviarían un caudal Q_2 y le suministrarían al agua una altura de bombeo H_{B1} , aportando cada bomba la mitad de la altura de bombeo.

En el caso que las bombas no sean idénticas, existe una curva para la bomba A y otra para la bomba B, la curva combinada se encuentra, sumando, para cada caudal, la altura de la bomba A más la altura de la bomba B, en la Fig. 4-16 se muestra un esquema de las curvas de dos bombas diferentes y la curva combinada (A+B).

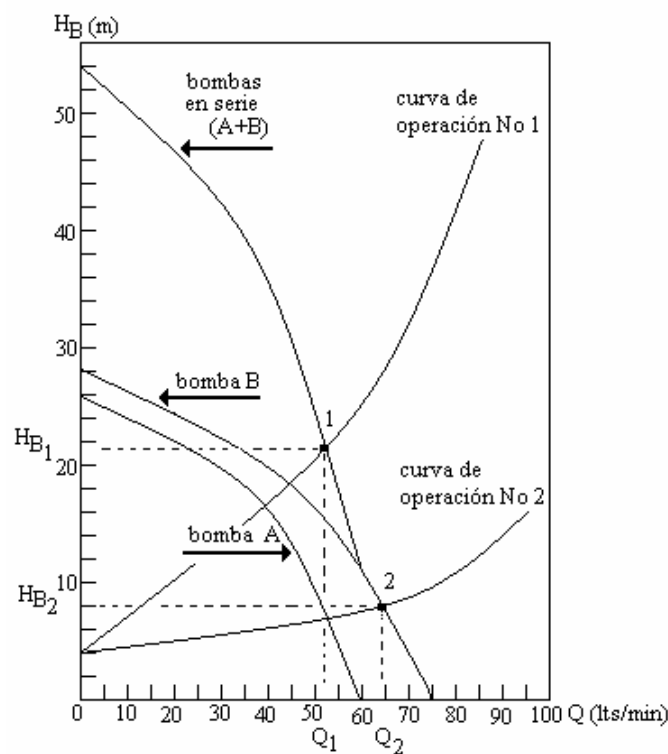


Fig. 4-16 Curva altura – caudal, para bombas diferentes y curva combinada para bombas en serie.

Supongamos que la curva de operación del sistema es la curva No 2, en este caso, si las dos bombas se encuentran en funcionamiento, la bomba A no realizará ningún trabajo ya que ella como máximo envía un caudal menor que el caudal Q_2 y se estará comportando como un obstáculo para el paso del agua, produciendo pérdida de energía como si fuera un accesorio o una turbina, en este caso todo el trabajo lo realizará la bomba B enviando un caudal Q_2 y suministrando una altura de bombeo H_{B2} .

Si se cerrara parcialmente la válvula No 4, aumentarían las pérdidas de energía y la curva de operación del sistema es la No 2, en este caso, si las dos bombas se encontrarían en funcionamiento, ellas enviarían un caudal Q_1 y suministrarían entre las dos bombas una altura de bombeo H_{B1} , repartido entre las dos bombas, según lo indicado en el gráfico.

Bombas en paralelo

En el caso de existir caudales de bombeo mayores que el aportado por una determinada bomba se podrían colocar dos o más bombas en paralelo (una al lado de la otra) con la finalidad de aumentar el caudal indicado anteriormente, según se muestra en el esquema de la Fig 4-17.

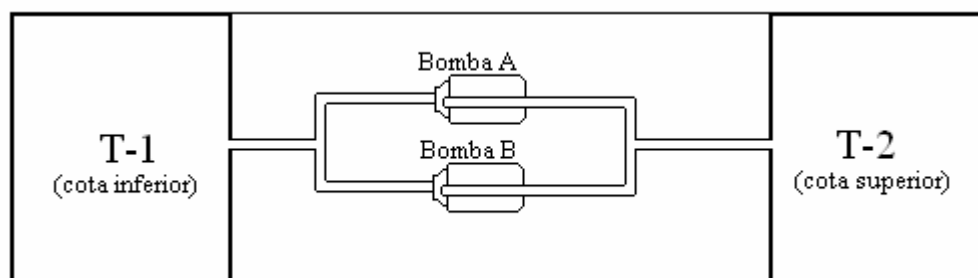


Fig. 4-17 Esquema, en planta, de instalación de bombas en paralelo.

Para obtener la curva característica combinada, de altura – caudal ($H - Q$), para cada altura se suman los caudales de cada bomba, en el caso de tener dos bombas idénticas los caudales serán el doble, en la Fig. 4-18 se muestra un esquema de la curva de dos bombas idénticas y la curva combinada ($A+B$).

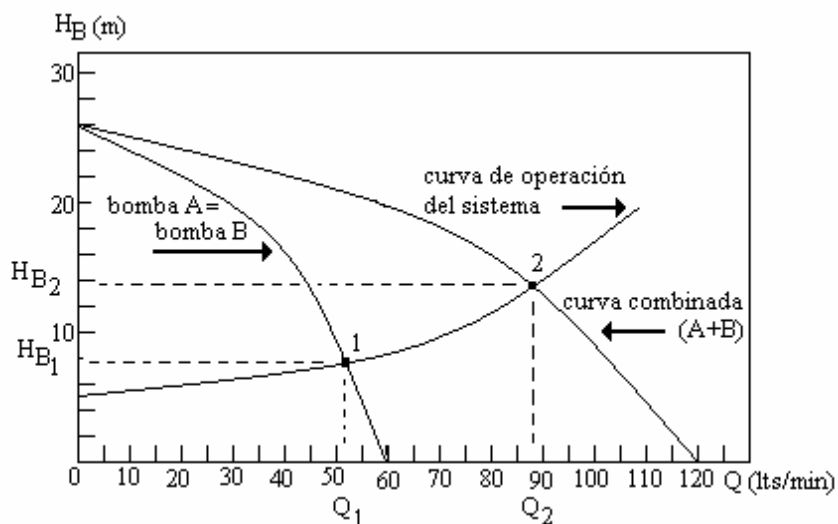


Fig. 4-18 Curva altura – caudal, para bombas idénticas y bombas en paralelo.

En el esquema anterior se puede observar que la curva de operación del sistema corta la curvas de las bombas en los puntos 1 y 2, si solamente trabaja una bomba esta enviará un caudal Q_1 y le suministrará al agua una altura de bombeo H_{B1} , si trabajan las dos bombas, como es el caso de bombas en paralelo, estas enviarán un caudal Q_2 y le suministrarán al agua una altura de bombeo H_{B2} , suministrando entre las dos bombas el doble del caudal.

En el caso que las bombas no sean idénticas, existe una curva para la bomba A y otra para la bomba B, la curva combinada se encuentra, sumando, para cada caudal la altura de la bomba A más la altura de la bomba B, en la Fig. 4-19 se muestra un esquema de las curvas de dos bombas diferentes y la curva combinada (A+B).

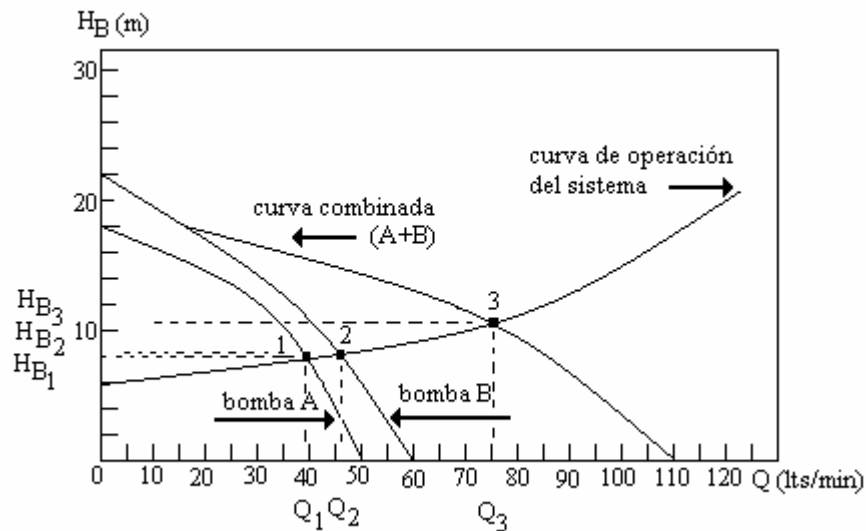


Fig. 4-19 Curva altura – caudal, para bombas diferentes y bombas en paralelo.

En este caso, cuando las dos bombas funcionan simultáneamente, el punto de operación es el No 3, enviando un caudal Q_3 suministrando una energía al fluido de H_{B3} .

Ejemplo 4.1

Determinar la cantidad de impulsores, la eficiencia y la potencia requerida por una bomba cuando se quiere enviar un caudal de 80 lts/s contra una carga dinámica total de 115 m, cuando esta trabaja a 1760 rpm, 2200 rpm y 2900 rpm. Las curvas características, suministradas en los Catálogos de Universal Pumps, se muestran en la Fig. 4-20. Hacer un análisis comparativo de las diferentes alternativas.

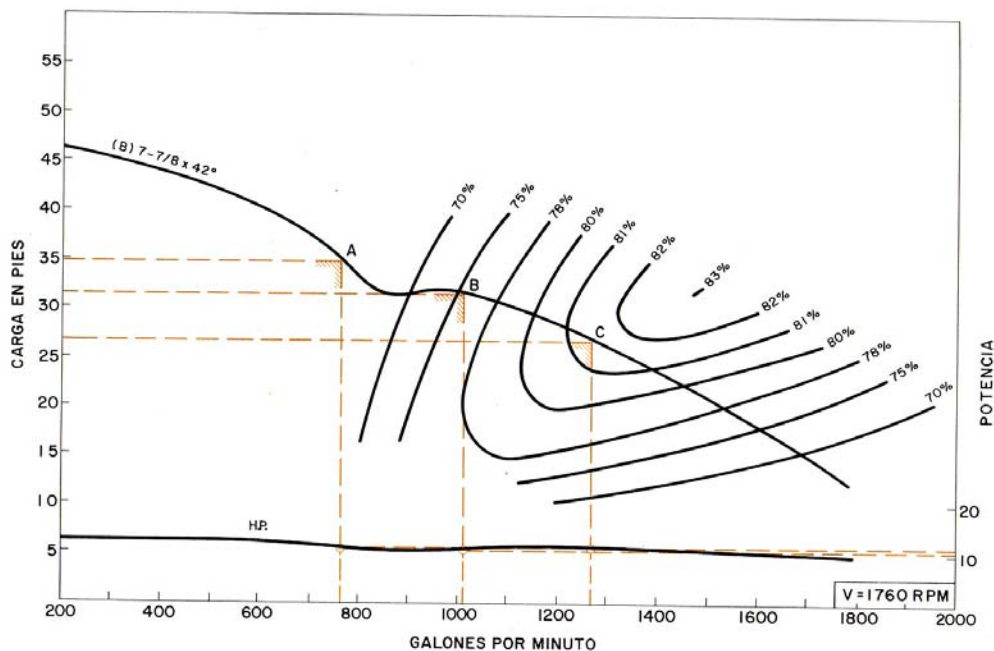


Fig. 4- 20 Curvas Características de la bomba (Catálogo Universal Pumps)

$$80 \text{ lts/s} \quad \text{equivalen a} \quad \frac{80}{3.78} \cdot 60 \quad = 1270 \text{ gpm}$$

$$115 \text{ m} \quad \text{equivalen a} \quad 115 \times 3.28 \quad = 377 \text{ pies}$$

Caso 1. Para 1760 rpm

La curva característica está construida para la velocidad solicitada de 1760 rpm, así en el gráfico se obtiene con 1270 gpm, en el punto C que la bomba con un rodete tiene las siguientes características:

$$H = 27 \text{ pie}, \quad P = 10.1 \text{ HP}, \quad \text{rendimiento} = 81.5 \%$$

La cantidad de rodets o impulsores es $n = \frac{377}{27} = 14$ impulsores

La potencia total $P = 10.1 \times 14 = 141.4$ HP

Caso 2. Para 2200 rpm

Para diámetro constante, según la ec.4.9 se tiene:

$$\left(\frac{Q}{N}\right)_1 = \left(\frac{Q}{N}\right)_2$$

¿cuanto tendría que ser el caudal (Q_1) girando a 1760 rpm (N_1), para que cuando se cambie el motor y gire a 2200 rpm (N_2) envíe un caudal de de 1270 gpm (Q_2)?.

$$Q_1 = ? \quad N_1 = 1760 \text{ rpm} \quad Q_2 = 1270 \text{ gpm} \quad N_2 = 2200 \text{ rpm}$$

$$Q_1 = Q_2 \left(\frac{N_1}{N_2} \right) = 1270 \left(\frac{1760}{2200} \right) = 1016 \text{ gpm}$$

con 1016 gpm en el gráfico se obtiene $H = 32$ pie, $P = 10$ HP, rendimiento = 75 %

Cuando se cambien las revoluciones la altura sería según al ec. 4.10

$$\left(\frac{H}{N^2}\right)_1 = \left(\frac{H}{N^2}\right)_2$$

si girando a 1760 rpm la bomba produce una altura de 32 pies, cuando gire a 2200 rpm ¿cual sería la altura que produciría?.

$$H_2 = H_1 \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 = 32 \left(\frac{2200}{1760} \right)^2 = 50 \text{ pies}$$

La cantidad de rodets o impulsores es $n = \frac{377}{50} = 8$ impulsores

Cuando se cambien las revoluciones, la potencia sería según al ec. 4.11

$$\left(\frac{P}{N^3}\right)_1 = \left(\frac{P}{N^3}\right)_2$$

$$P_2 = P_1 \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^3 = 10 \left(\frac{2200}{1760}\right)^3 = 19.5 \text{ HP}$$

La potencia total para 8 impulsores es: $P = 19.5 \times 8 = 156 \text{ HP}$

Caso 3. Para 2900 rpm

Para diámetro constante, según la ec.4.9 se tiene:

$$\left(\frac{Q}{N}\right)_1 = \left(\frac{Q}{N}\right)_2$$

¿cuanto tendría que ser el caudal (Q_1) girando a 1760 rpm (N_1), para que cuando se cambie el motor y gire a 2900 rpm (N_2) envíe un caudal de de 1270 gpm (Q_2)?.

$$Q_1 = ? \quad N_1 = 1760 \text{ rpm} \quad Q_2 = 1270 \text{ gpm} \quad N_2 = 2900 \text{ rpm}$$

$$Q_1 = Q_2 \left(\frac{N_1}{N_2}\right) = 1270 \left(\frac{1760}{2900}\right) = 771 \text{ gpm}$$

con 1016 gpm en el gráfico se obtiene $H = 35 \text{ pie}$, $P = 10.2 \text{ HP}$, $\text{rendimiento} = 68 \%$

Cuando se cambien las revoluciones la altura sería según al ec. 4.10

$$\left(\frac{H}{N^2}\right)_1 = \left(\frac{H}{N^2}\right)_2$$

si girando a 1760 rpm la bomba produce una altura de 35 pie, cuando gire a 2900 rpm ¿cual sería la altura que produciría?.

$$H_2 = H_1 \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 = 35 \left(\frac{2900}{1760}\right)^2 = 95 \text{ pies}$$

La cantidad de rodets o impulsores es $n = \frac{377}{95} = 4$ impulsores

Cuando se cambien las revoluciones la potencia sería según al ec. 4.11

$$\left(\frac{P}{N^3}\right)_1 = \left(\frac{P}{N^3}\right)_2$$

$$P_2 = P_1 \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^3 = 10.2 \left(\frac{2900}{1760}\right)^3 = 45.6 \text{ HP}$$

La potencia total para 8 impulsores es: $P = 45.6 \times 4 = 182.4 \text{ HP}$

Cuadro resumen comparativo
 Gasto de bombeo: 80 lts/s = 1270 gpm
 Altura dinámica: 115 m = 377 pies

	Solución A	Solución B	Solución C
Velocidad (rpm)	1760	2200	2900
Número de impulsores	14	8	4
Eficiencia (%)	81.5	75	68
Potencia requerida	141.4	160	182.4

Del cuadro anterior se puede eliminar la solución C debido a su baja eficiencia, la solución A no parece conveniente debido a la gran cantidad de impulsores, por lo que posiblemente el costo del equipo se alto, quedando como alternativa más apropiada la solución B.

Ejemplo 4.2

Suponer que una bomba indicada en la Fig. 4-13, tiene una altura de succión neta positiva (NPSH), recomendada por el fabricante de 4.25 m y que debe enviar un caudal de 110 lts/s a través de una tubería de 12" de diámetro. La tubería tiene succión tiene una longitud de 16.5 m y un coeficiente de fricción, correspondiente a la ecuación de Darcy-Weisbach de 0.01375. El coeficiente global de pérdidas concentradas o menores se puede considerar de 2.4 el cual incluye la rejilla de entrada, la válvula de pie y el codo. Calcular la máxima altura a la que se puede colocar la bomba (z_2) por encima de la superficie del agua en el tanque de suministro. Suponer una presión atmosférica local de 90000 (Pascal o N/m^2) y que la presión de vapor del agua, para una temperatura de 15°C, es de 1666.2 Pa.

La cota de la bomba se puede determinar según la ec. 4.21, así

$$Z_2 = \frac{p_{atm}}{\gamma} - \frac{p_v}{\gamma} - NPSH - \left(\sum h_f + \sum h_m \right)$$

determinación de las pérdidas por fricción según la ecuación de Darcy-Weisbach

$$h_f = f \frac{1}{D} \frac{V^2}{2g} = f \frac{1}{D} \frac{Q^2}{A^2 2g}$$

$$h_f = 0.01375 \frac{16.5}{12 \times 0.0254} \frac{\left(\frac{110}{1000} \right)^2}{\left(\frac{\pi}{4} (12 \times 0.0254)^2 \right)^2 \times 2 \times 9.81} = 0.0862 \text{ m}$$

determinación de las pérdidas menores o concentradas

$$h_m = \sum k \frac{V^2}{2g} = \sum k \frac{Q^2}{A^2 2g}$$

$$h_m = 2.4 \frac{\left(\frac{110}{1000} \right)^2}{\left(\frac{\pi}{4} (12 \times 0.0254)^2 \right)^2 \times 2 \times 9.81} = 0.278 \text{ m}$$

al remplazar los valores se tiene

$$Z_2 = \frac{\left(\frac{90000}{9.81} \right)}{1000} - \frac{\left(\frac{1666.2}{9.81} \right)}{1000} - 4.25 - (0.0862 + 0.278) = 4.38 \text{ m}$$

Ejemplo 4 – 3

A partir de las curvas, altura – caudal, correspondiente a una bomba modelo DPX-65, mostrada en la Fig 4-21 y suministrada por la fábrica DOMOSA, construir las curvas características de dos bombas idénticas cuando trabajan en serie y cuando trabajan en paralelo

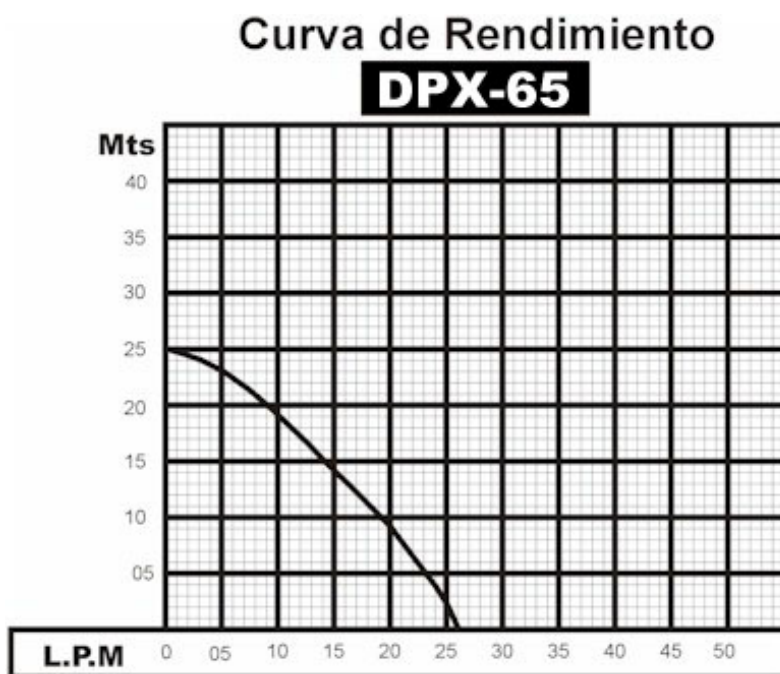


Fig. 4-21 Curva altura – caudal, para una bomba DOMOSA.

a. bombas en serie

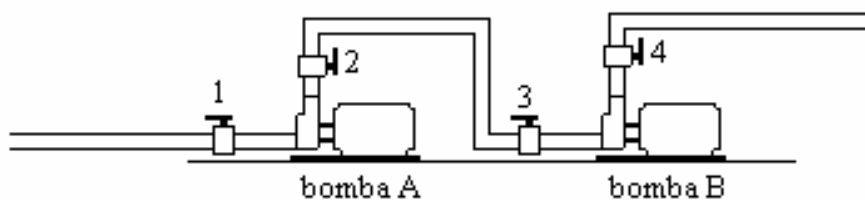


Fig. 4 – 22 Bombas DOMOSA instaladas en serie.

Directamente se toman lecturas del gráfico y se obtiene lo siguiente:

Q Lts/min	H M	2H m
0	25	50
5	23	46
10	19	38
15	14	28
20	9	18
25	2	4
26	0	0

Al graficar se obtiene la curva para una bomba única y la curva combinada para bombas instaladas en serie, según se muestra en la Fig.4-23.

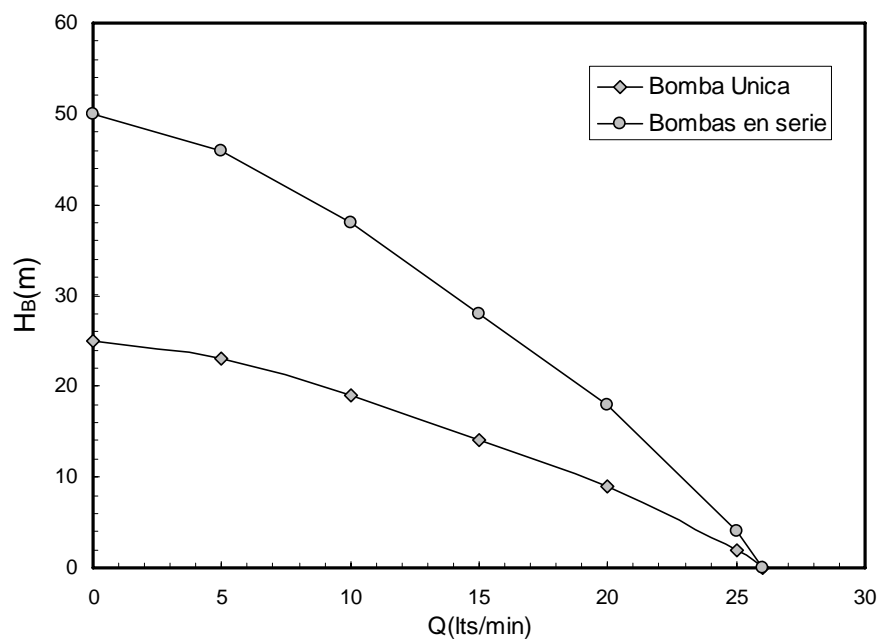


Fig. 4 – 23 Curva única y curva combinada para bomba DOMOSA instalada en serie.

b. bombas en paralelo

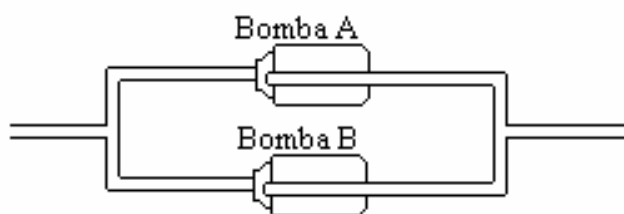


Fig. 4 – 24 Bombas DOMOSA instaladas en paralelo.

Directamente se toman lecturas del gráfico y se obtiene lo siguiente:

H m	Q lts/min	2Q lts/min
25	0	0
23	5	10
19	10	20
14	15	30
9	20	40
2	25	50
0	26	52

Al graficar se obtiene la curva para una bomba única y la curva combinada para bombas instaladas en paralelo, según se muestra en la Fig.4-24.

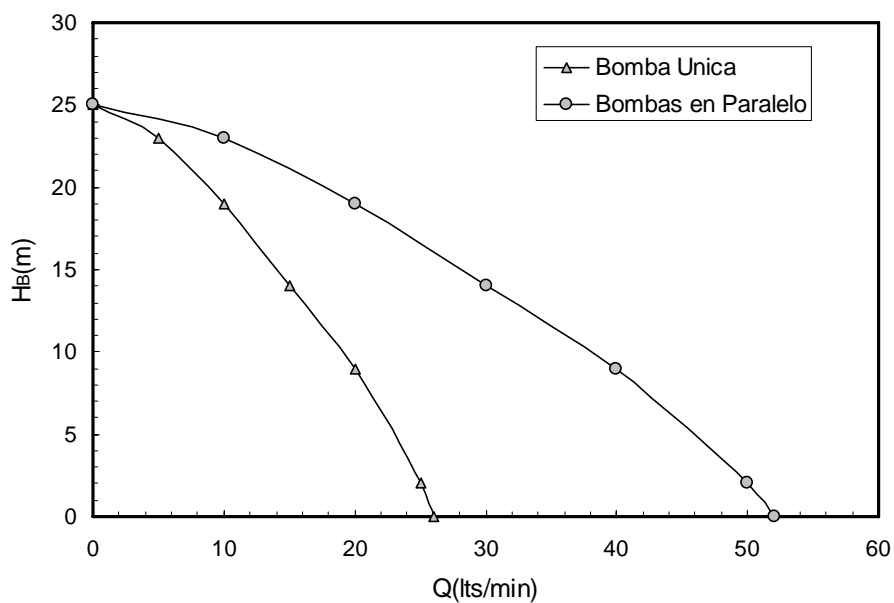


Fig. 4 – 25 Curva única y curva combinada para bomba DOMOSA instalada en paralelo.

Capítulo 5

Equipo experimental

Análisis previos

Con el fin de construir el equipo experimental se procedió a realizar mediciones de caudales con el fin de estimar los volúmenes de los tanques necesarios para dicha instalación.

Primero, se colocó una bomba única alimentada por un tanque, para conducir el agua a la parte superior de otro tanque con cota superior 0.84 m sobre el eje de la bomba según se muestra en las figuras 5-1 y 5-2.

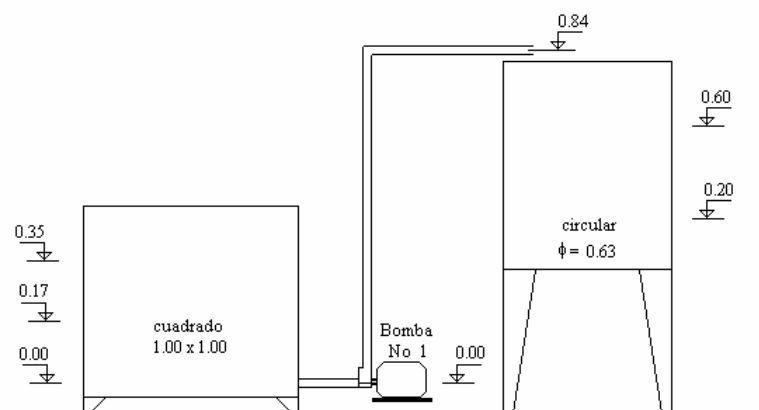


Fig. 5-1 Esquema de la instalación provisional con bomba única.



Fig. 5-2 Foto de la instalación provisional de bomba única.

En las mediciones se observó que en el tanque inferior el nivel del agua descendía desde la cota 0.35 m hasta la cota 0.17 m y el agua se almacenaba en el tanque superior, de 0.63 m de diámetro, ascendiendo desde la cota 0.20 m hasta la cota 0.60 m en un tiempo de 215 segundos, así el caudal enviado por la bomba para un desnivel promedio entre la salida de la tubería y el tanque inferior de

$$\Delta z = 0.84 - \frac{0.35 + 0.17}{2} = 0.58 \text{ m}$$

es de

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{\frac{\pi}{4} 0.63^2 \times 0.40 \times 1000 \times 60}{215} = \frac{124.63 \times 60}{215} = 34.80 \text{ l/min}$$

Luego como segundo paso, se colocaron dos bombas en serie alimentadas por un tanque, para conducir el agua a la parte superior de otro tanque ubicado 0.83 m sobre el eje de la primera bomba, según se muestra en las figuras 5-3 y 5-4.

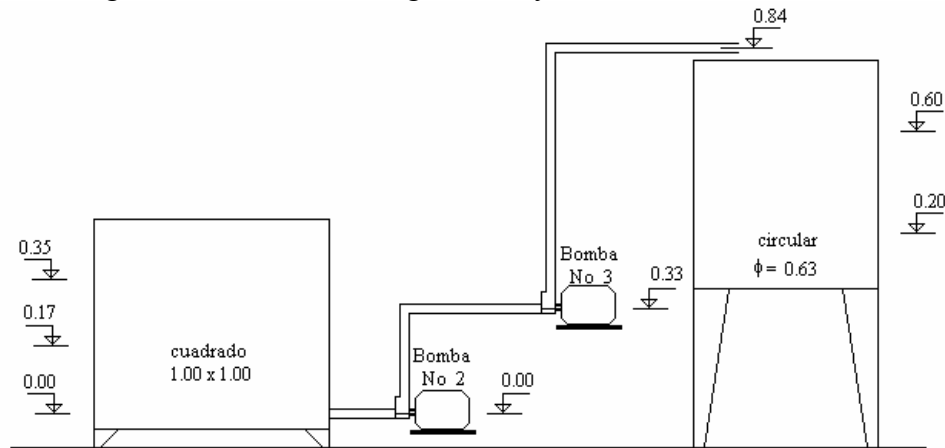


Fig. 5-3 Instalación provisional de bombas en serie.



Fig. 5-2 Foto de la instalación provisional de bombas en serie.

En las mediciones se observó que en el tanque inferior el nivel del agua descendía desde la cota 0.35 m hasta la cota 0.17 m y el agua se almacenaba en el tanque superior ascendiendo desde la cota 0.20 m hasta la cota 0.60 m en un tiempo de 215 segundos, así el caudal enviado por las bombas en serie para un desnivel promedio entre la salida de la tubería y el tanque inferior de

$$\Delta z = 0.84 - \frac{0.35 + 0.17}{2} = 0.58 \text{ m}$$

es de

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{\frac{\pi}{4} 0.63^2 \times 0.40 \times 1000 \times 60}{211} = \frac{124.63 \times 60}{211} = 34.80 \text{ l/min}$$

donde se observa que cuando se colocan dos bombas en serie para un mismo desnivel el caudal se mantiene igual a cuando se coloca una bomba única, en estas mediciones previas no se determinaron presiones en la entrada ni en la salida de las bombas.

Como tercer paso se colocaron dos bombas en paralelo alimentadas por un tanque, para conducir el agua a la parte superior de otro tanque ubicado 0.83 m sobre las bombas, según se muestra en la figura 5-5 , 5-6 y 5-7.

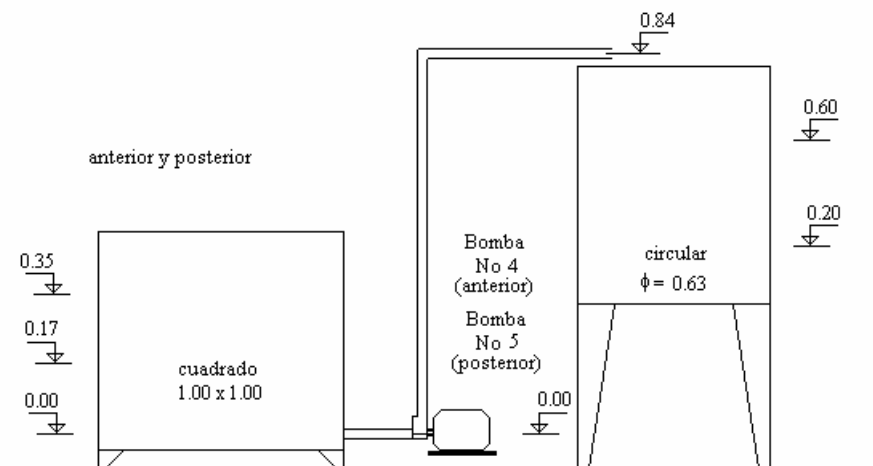


Fig. 5-5 Esquema de instalación provisional de bombas en paralelo.

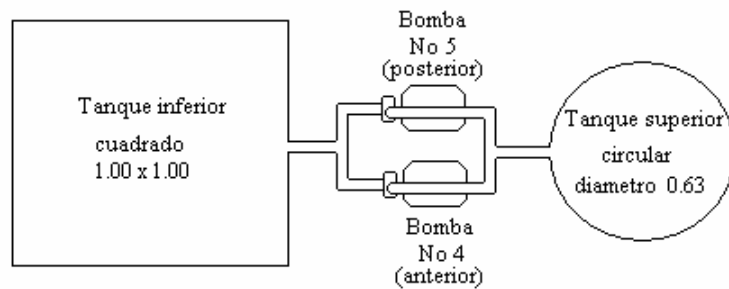


Fig. 5-6 Esquema de instalación provisional, en planta, de bombas en paralelo.



Fig. 5-7 Foto de la instalación provisional de bombas en paralelo.

En las mediciones se observó que en el tanque inferior el nivel del agua descendía desde la cota 0.35 m hasta la cota 0.17 m y el agua se almacenaba en el tanque superior ascendiendo desde la cota 0.20 m hasta la cota 0.60 m en un tiempo de 215 segundos, así el caudal enviado por las bombas en paralelo para un desnivel promedio entre la salida de la tubería y el tanque inferior de

$$\Delta z = 0.84 - \frac{0.35 + 0.17}{2} = 0.58 \text{ m}$$

es de

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{\frac{\pi}{4} 0.63^2 \times 0.40 \times 1000 \times 60}{110} = \frac{124.63 \times 60}{110} = 67.98 \text{ l/min}$$

donde se observa que cuando se colocan dos bombas en paralelo para un mismo desnivel el caudal se duplica a cuando se coloca una bomba única, o dos bombas en serie en estas mediciones previas no se determinaron presiones en la entrada ni en la salida de las bombas.

El volumen de almacenamiento para los tiempos considerados fue de 124.63 litros así considerando un factor de seguridad se decidió construir los tanques con las siguientes medidas:

Tanque de salida T-1 y tanque de llegada T-2.

Ancho = 0.49 m (interno)
Largo = 1.00 m (interno)
Alto total = 0.50 m (interno)

Aliviadero de sección transversal de 0.10 m de ancho x 0.10 m de alto x 1.00 m de largo, colocado 0.05 m por debajo de la parte superior del tanque, según se muestra en la fig.5-10 y 5-12, el volumen útil del tanque T-1 y T-2 es de

$$V_1 = 0.35 \times 0.49 \times 1.00 \times 1000 = 171 \text{ litros}$$
$$V_2 = 0.10 \times 0.39 \times 1.00 \times 1000 = 39 \text{ litros;}$$

la suma de los anteriores volúmenes de un volumen útil de 210 litros

Tanque volumétrico T-3.

Ancho = 0.49 m (interno)
Largo = 1.00 m (interno)
Alto total = 0.50 m (interno)

Aliviadero de sección transversal de 0.10 m de ancho x 0.10 m de alto x 1.00 m de largo, colocado 0.10 m por debajo de la parte superior del tanque, según se muestra en la fig.5-14, así el volumen útil del tanque volumétrico T-3 es de

$$V_1 = 0.30 \times 0.49 \times 1.00 \times 1000 = 147 \text{ litros}$$
$$V_2 = 0.10 \times 0.39 \times 1.00 \times 1000 = 39 \text{ litros;}$$

la suma de los anteriores volúmenes de un volumen útil de 186 litros

El volumen útil de los tres tanques es de

$$V = 210 + 210 + 186 = 606 \text{ litros}$$

Tanque general T-0.

Ancho = 1.00 m (interno)

Largo = 1.00 m (interno)

Alto total = 0.80 m (interno)

El tanque general no posee aliviadero y debe de tener capacidad para almacenar el agua de los tanque T-1, T-2 y T-3, adicionalmente tener una altura mínima que permita el funcionamiento de las bombas inferiores (No 6 y No 7) sin que se produzca vórtice en la entrada, con la consecuente introducción de agua a las tuberías y un borde libre como seguridad.

El volumen total del tanque general es de

$$V_{\text{total}} = 1.00 \times 1.00 \times 0.80 \times 1000 = 800 \text{ litros}$$

En el que el agua podría almacenarse de la manera que se indica en la fig. 5-8.

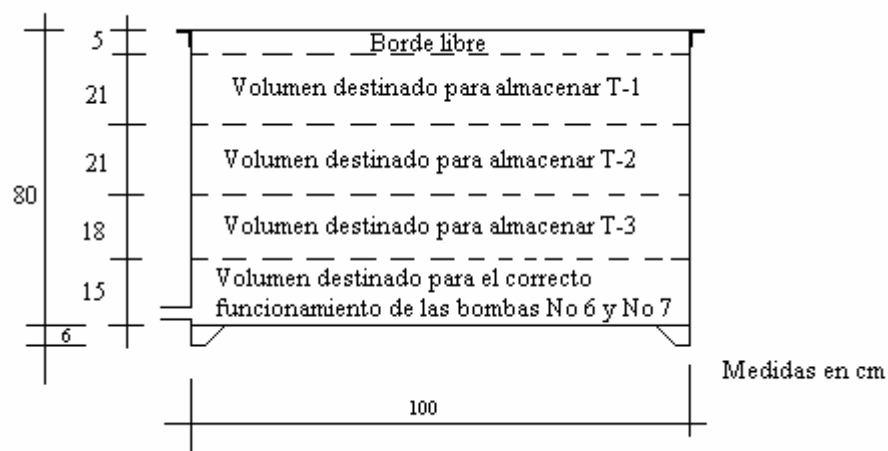


Fig. 5-8 Capacidades de almacenamiento del tanque general T-0

Construcción del equipo experimental.

El equipo experimental está formado por:

1. Mesa metálica
2. Tanque general T-0
3. Tanque de salida T-1
4. Tanque de llegada T-2
5. Tanque volumétrico T-3
6. Bombas hidráulicas
7. Circuito eléctrico

Descripción de cada uno de los elementos del equipo experimental.

Mesa Metálica:

Construida con tubo pulido de sección 1 ½" x 3" con ocho tubos verticales para apoyo de los tanques, la parte superior por seis tubos horizontales y lámina metálica calibre 14 forrada con material plástico estriado, con dimensiones de 1.20 m de ancho, 2.40 m de largo y 0.97 m de alto, cuya vista frontal se muestra en la Fig. 5-8.

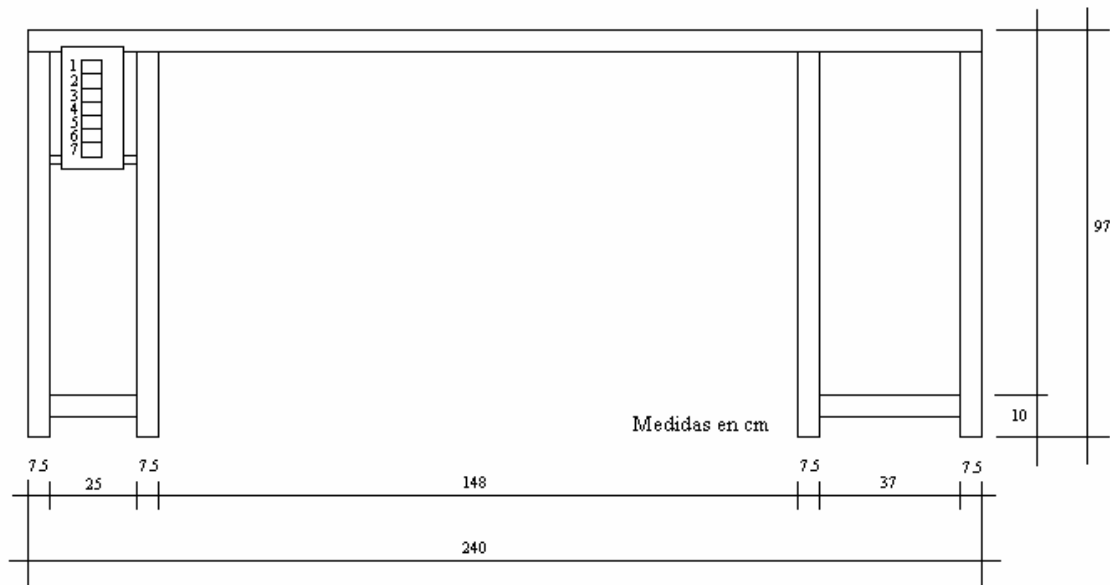


Fig. 5-8 Mesa de experimentación.

Tanque general T-0:

En la parte de abajo de la mesa se encuentra instalado un tanque general (T-0) metálico, soldado, construido con lámina de 3/16" de espesor de dimensiones 0.99 m de ancho, 0.99 m

de largo y 0.80 m de alto, con salida para limpieza en la parte central inferior con tubería y llave de paso, salida para tubo piezométrico de vidrio con cinta métrica y dos salidas formadas por anillos soldados de hierro galvanizado (HG) de 1" de diámetro para alimentar dos bombas según se muestra en la Fig. 5-9.

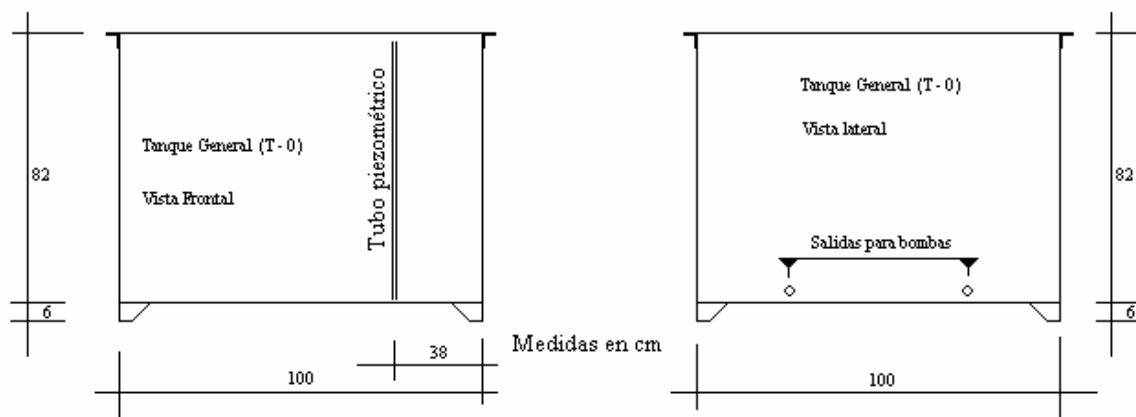


Fig. 5-9 Tanque general de alimentación T-0

Tanque de salida T-1

Las bombas alimentadas por el tanque T-0, conducen el agua al tanque T-1, metálico, soldado, construido con lámina de hierro de 3/16" de espesor de dimensiones 0.50 m de ancho, 1.02 m de largo y 0.50 m de alto con sistema de rebose formado por un vertedero de 100 cm de largo el cual descarga a un canal de sección de 10 cm de alto y 10 cm de ancho conectado a un tubo vertical de 2" de diámetros que conduce el agua al tanque general T-0, en la parte inferior existe una tubería de limpieza de 1/2" de diámetro con su correspondiente llave de paso que conduce el agua al tanque general T-0, salida para un tubo piezométrico de vidrio con cinta métrica y tres salidas formadas por anillos de 1" de diámetro, soldados, de hierro galvanizado (HG) para alimentar las bombas del experimento, en la Fig. 5-10 se muestra un esquema y en la Fig. 5-11 el proceso de soldadura durante la construcción.

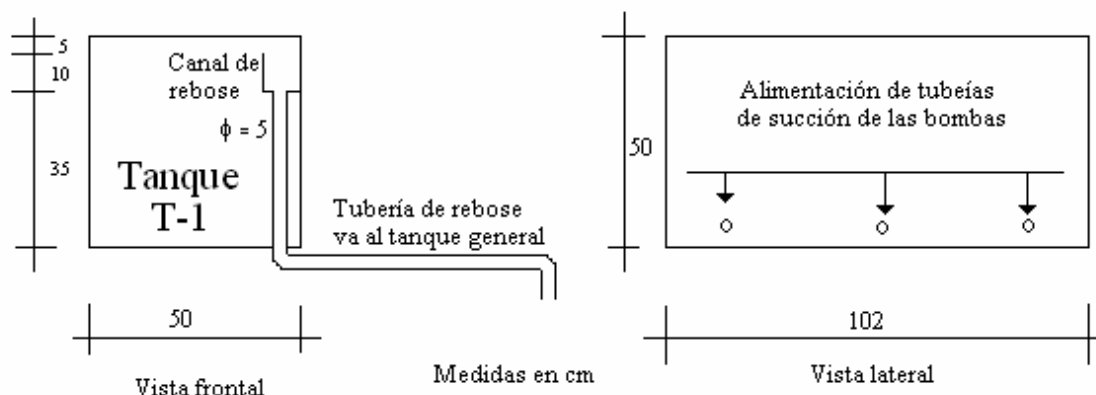


Fig. 5-10 Tanque T-1



Fig. 5-11 Construcción del tanque se salida T-1

Tanque de llegada T-2

Desde el tanque T-1 el agua es conducida mediante el conjunto de bombas al tanque T-2, metálico, soldado, construido con lámina de hierro de 3/16" de espesor de dimensiones 0.50 m de ancho, 1.02 m de largo y 0.50 m con rebose formado por un vertedero 100 cm de largo el cual descarga a un canal de sección de 10 cm de alto y 10 cm de ancho el canal descarga en tubo vertical de 2" de diámetro que conduce directamente el agua al tanque volumétrico T-3, en la parte inferior existe una tubería de limpieza de 1/2" de diámetro con su correspondiente llave de paso que conduce el agua directamente al tanque volumétrico T-3, salida para un tubo piezométrico de vidrio con cinta métrica y tres llegadas formadas por anillos de 1" de diámetro, soldados, de hierro galvanizado (HG) para una bomba única, dos bombas instaladas en serie y dos bombas instaladas en paralelo instaladas en la mesa experimental, según se muestra en las Fig. 5-12 y 5.13 .

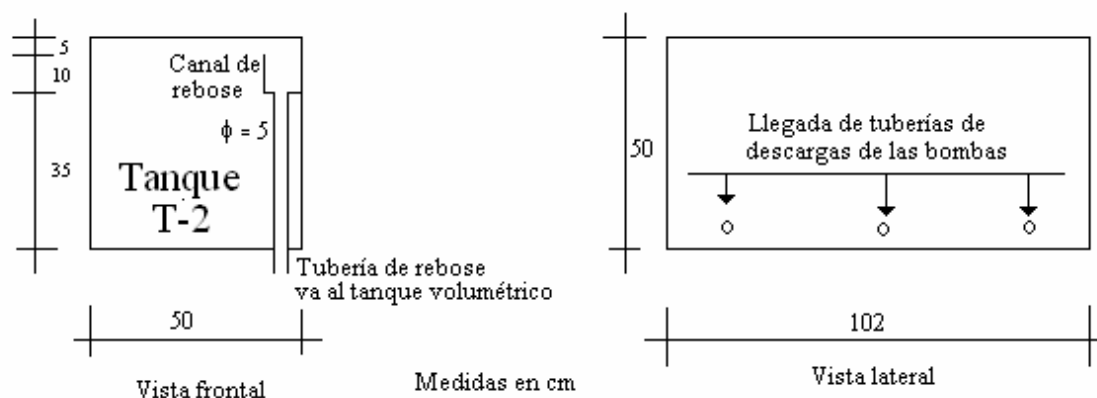


Fig. 5-12 Tanque T-2



Fig. 5-13 tanque de llegada T-2 y tanque volumétrico T-3

Tanque volumétrico T-3

El tanque, T-2, se encuentra apoyado sobre el tanque volumétrico T-3, metálico, soldado, construido con lámina de hierro de 3/16" de espesor de dimensiones 0.50 m de ancho 1.02 m de largo y 0.50 m de alto con rebose central formado por un vertedero de 100 cm según el cual descarga a un canal de sección de 10 cm de alto y 10 cm de ancho el cual descarga a través de un tubo vertical de 2 " de diámetro, directamente al tanque general T-0, en la parte inferior lateral se encuentra una tubería de 2" de diámetro que se utiliza para determinar el caudal y para limpieza, salida y un tubo piezométrico de vidrio con cinta métrica según se muestra en las Fig. 5-13 y 5.14.

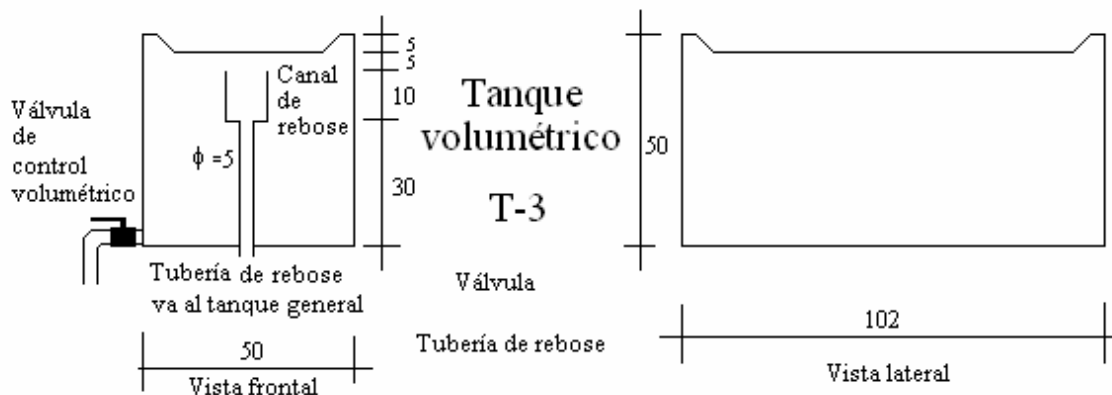


Fig. 5 -14 Tanque volumétrico T-3

Bombas hidráulicas

El sistema posee siete bombas idénticas con las siguientes características:

Q máximo	35 l/min
H máxima	35 m
Voltaje	110 V
Potencia	½ HP
Revoluciones	3400 rpm

En la Fig. 5-15, se muestra una foto de una de las bombas utilizadas para la construcción del equipo experimental.



Fig. 5-15 Bomba hidráulica, mostrando carcasa, rodete y motor.

El agua es transportada del tanque T-0 al tanque T-1 mediante dos bombas independientes instaladas en la parte inferior de la mesa, entre dichos tanques se encuentran colocadas válvulas de esfera, válvulas Check verticales, junta universal y todos los elementos necesarios para dicha instalación.

El agua es transportada del tanque T-1 al tanque T-2 mediante cinco bombas de la siguiente manera:

- Mediante una bomba única con sus accesorios tales como, válvula esférica en la entrada, tubo piezométrico en la tubería de succión, manómetro en la tubería de descarga, válvula de esfera en la tubería de descarga, junta universal, y válvula Check horizontal.
- Mediante dos bombas instaladas en serie con los accesorios descritos anteriormente.
- Mediante dos bombas instaladas en paralelo con los accesorios descritos anteriormente.

Los cuatro tanques descritos anteriormente se encuentran ubicados en la mesa de experimentación como se indica en la Fig. 5-7.

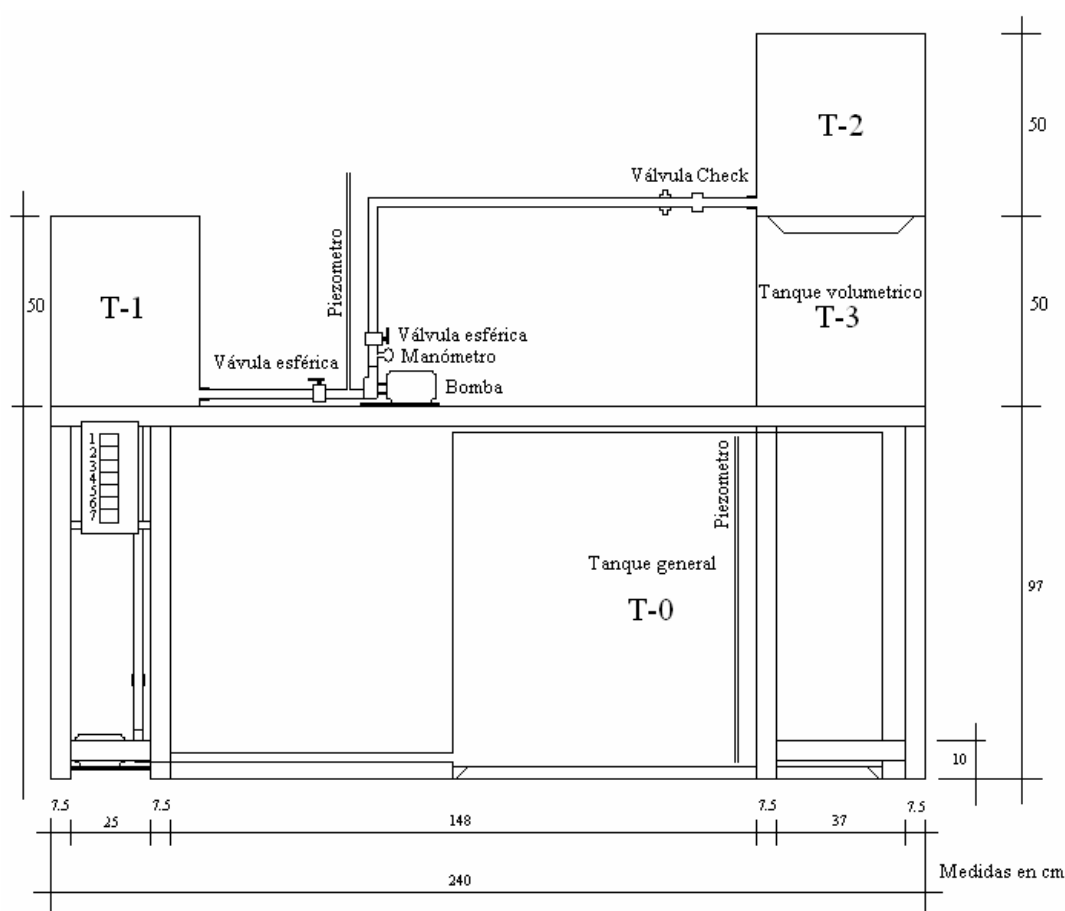


Fig. 5-16 Vista frontal del conjunto experimental.

En la Fig. 5-17 se muestra una planta del conjunto experimental y en la Fig. 5-18 una foto.

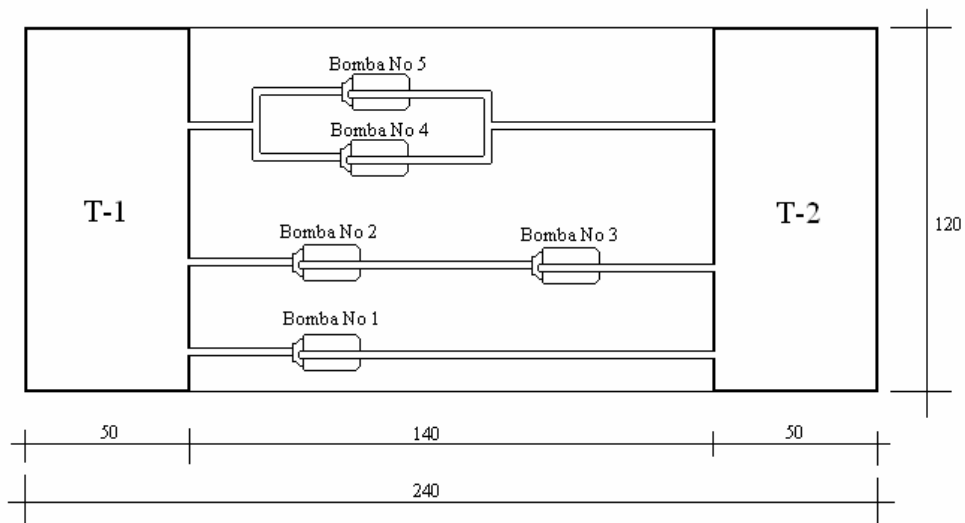


Fig. 5-17 Planta del conjunto experimental.



Fig.5-18 Foto, en planta, del conjunto experimental

Circuito eléctrico:

Las bombas se encuentran conectadas a un tablero eléctrico de siete breakers de 15 amperios cada uno los cuales trabaja como interruptor de corriente y no como protector. Este tablero es alimentado, eléctricamente, desde un tomacorriente de uso general existente el Laboratorio de Hidráulica, en la Fig. 5.19 se encuentra una foto del tablero eléctrico.



Fig. 5-19 Foto del tablero eléctrico

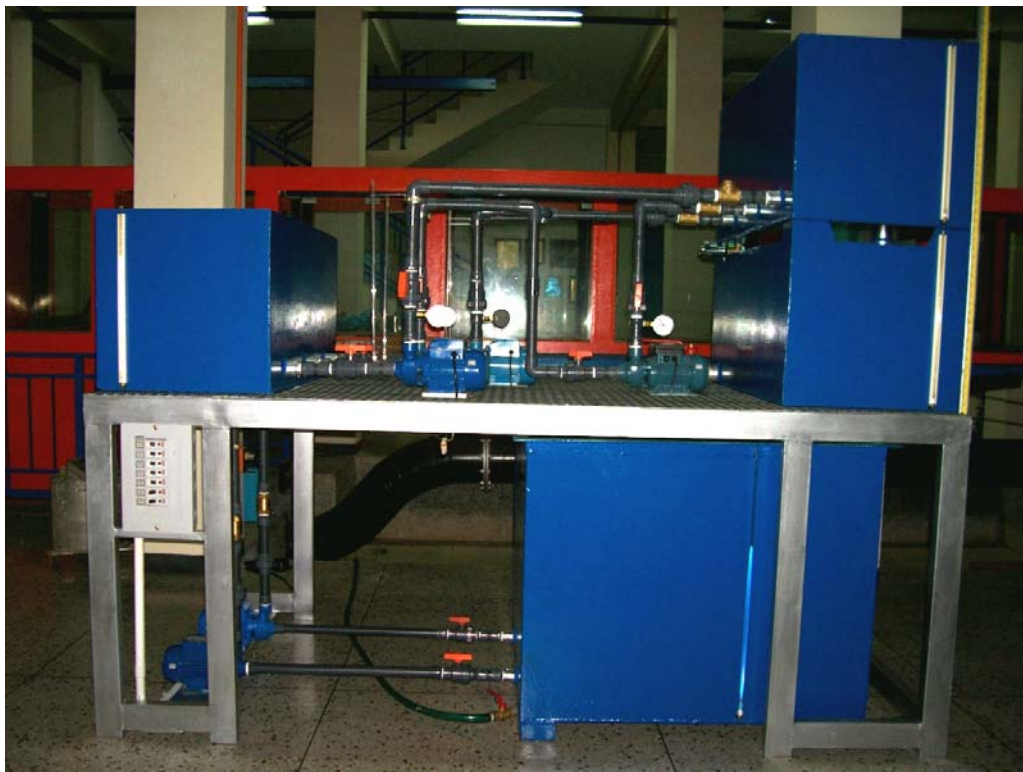


Fig. 5-20 Foto frontal del conjunto experimental.

Operación del equipo

Para la puesta en marcha del equipo se deben seguir los siguientes pasos:

Comprobar:

- Que las llaves de limpieza de los tanques T-0, T-1 y T-2 se encuentran cerradas.
- Que el tanque general T-0, colocado debajo de la mesa, se encuentre lleno de agua hasta la cota 0.86 m.
- Que el cable de alimentación de la energía eléctrica se encuentre conectado al sistema general de energía del Laboratorio.

Seguidamente se procede a encender las bombas inferiores identificadas con los números 6 y 7 con el fin de llenar el tanque de salida T-1, estas bombas deben de permanecer en funcionamiento durante todo el tiempo que se realicen los experimentos, en el caso de no utilizar las bombas colocadas sobre la mesa experimental, el agua enviada por las bombas 6 y 7 retornan al tanque general T-0 a través de la tubería de rebose.

Adicionalmente se debe de llenar el tanque de llegada T-2, mediante la puesta en marcha de una de las bombas colocadas sobre la mesa de experimentación, de manera que el agua rebose hacia el tanque volumétrico T-3, para así garantizar que el desnivel entre las superficies de los tanques de salida y llegada permanecerá constante, en este momento los tanques T-1 y T-2 se encuentran llenos y se puede iniciar la realización de cualquier experimento.

Se podrían realizar de manera independiente y mediante la instalación de los manómetros adecuados los siguientes experimentos:

- Dibujar la instalación mediante mediciones en sitio (cotas, progresivas, diámetros, etc).
- Determinación del caudal mediante el método volumétrico utilizando el tanque T-3 y un cronómetro.
- Velocidad media en la tubería mediante la ecuación de continuidad.
- Presión en la tubería de succión y en la de descarga mediante piezómetros y/o manómetros colocados para tal fin.

- Altura de bombeo suministrada al agua por la bomba, para esas condiciones de trabajo, mediante las lecturas manométricas y la ecuación correspondiente.
- Dibujo de la línea de energía mediante los manómetros colocados a lo largo de la tubería.
- Determinación de pérdida de energía en válvula esférica, codo, válvula Check o unidireccional y tubería.
- Determinación de las curvas características de las bombas (altura, potencia hidráulica, potencia eléctrica y rendimiento en función del caudal).
- Análisis del comportamiento de bombas instaladas en serie (caudal, altura de bombeo, curvas características, presiones, etc.).
- Análisis del comportamiento de bombas instaladas en paralelo (caudal, altura de bombeo, curvas características, presiones, etc.).

Experimento No 1

Para la bomba No 1 ubicada en el banco de experimentación realizar la las curvas características correspondientes a:

Altura, potencia consumida, potencia hidráulica y rendimiento en función del caudal

Tabla de mediciones para Curvas Características

Bomba No. 1

Fecha: 04 – 11 - 2005

Datos tomados por: Lionel Fernández

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Exp.	Presión		Caudal			Potencia
	hs	p _D	C _i	C _f	t	P _{elec.}
	cm	lbs/in ²	Cm	cm	s	W
1 válvula abierta	26.9	2	208	228	161	385
2	29.0	5	208	228	177	393
3	31.1	8	208	228	196	393
4	33.7	14	208	228	235	413
5	36.5	22	208	228	317	443
6	39.1	34	208	228	605	495
7 válvula cerrada	40.0	49	----	----	-----	585

Descripción de columnas

- (1) Número del experimento.
- (2) h_s altura de presión en la entrada de la bomba en cm de agua.
- (3) p_D presión en la salida de la bomba en lbs/in².
- (4) c_i cota inicial para la determinación volumétrica del caudal, en cm.
- (5) c_f cota final para la determinación volumétrica del caudal, en cm.
- (6) t tiempo transcurrido para la determinación volumétrica del caudal, en segundos.
- (7) P potencia eléctrica consumida por el grupo motobomba, en vatios.

Cálculo de curvas características

Bomba No. 1

Fecha: 04-11-2005

Cálculos realizador por: Lionel Fernández

(1)	(8)	(9)	(10)	(11)
Exp.	H_B	Q	$P_{hid.}$	η
	(m)	(lts/min)	(W)	(%)
1	1.14	36.52	6.79	1.76
2	3.23	33.22	17.51	4.46
3	5.32	30.00	26.06	6.63
4	9.52	25.02	38.89	9.41
5	15.12	18.54	45.80	10.34
6	23.54	9.71	37.36	7.55
7	34.08	0.00	0.00	0.00

$$\text{col. (8)} \rightarrow H_B(m) = \frac{p_s}{\gamma} - \frac{p_e}{\gamma} = \frac{\text{col.(3)}}{1.422335} - \frac{\text{col.(2)}}{100}$$

$$\text{col. (9)} \rightarrow Q(\text{lts/min}) = \frac{\forall}{t} = \frac{\left(\frac{\text{col.(5)} - \text{col.(4)}}{100} \right) \times 0.49 \times 1000 \times 60}{\text{col.(6)}}$$

$$\text{col.(10)} \rightarrow P(W) = Q\gamma H_B = \frac{\left(\frac{\text{col.(9)}}{1000 \times 60} \right) \times 1000 \times \text{col.(8)}}{0.102}$$

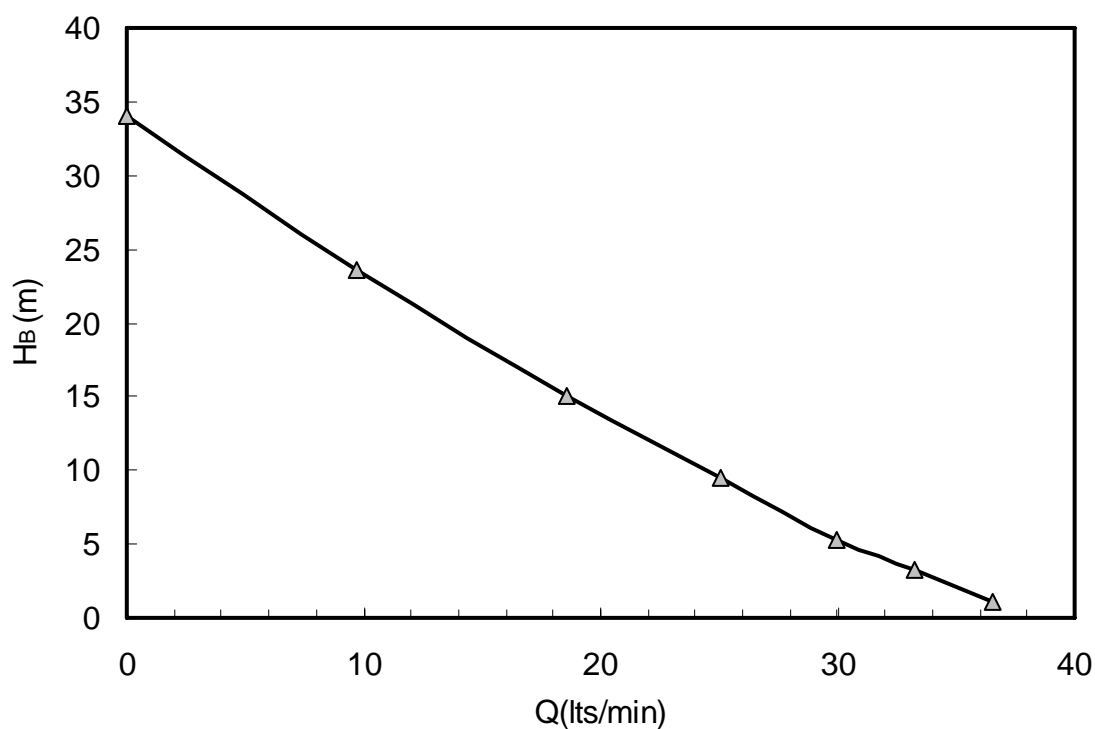


Fig 5-21 Curva experimental de altura – caudal para la bomba No 1

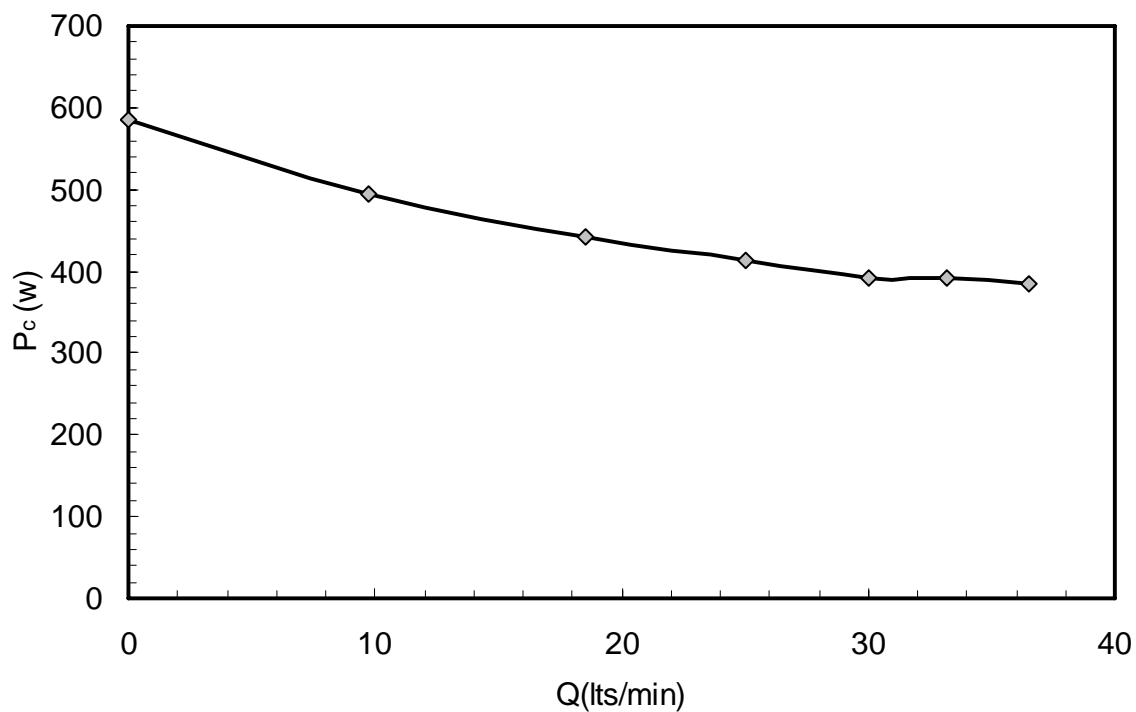


Fig 5-22 Curva experimental de potencia eléctrica consumida – caudal para la bomba No 1

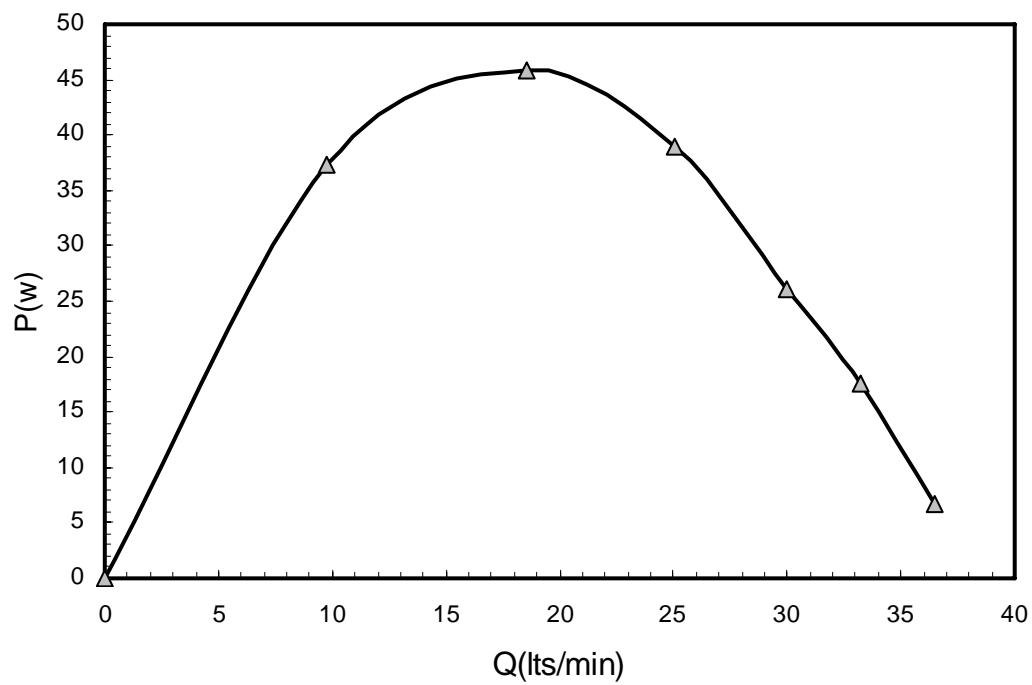


Fig 5-23 Curva experimental de potencia hidráulica – caudal para la bomba No 1

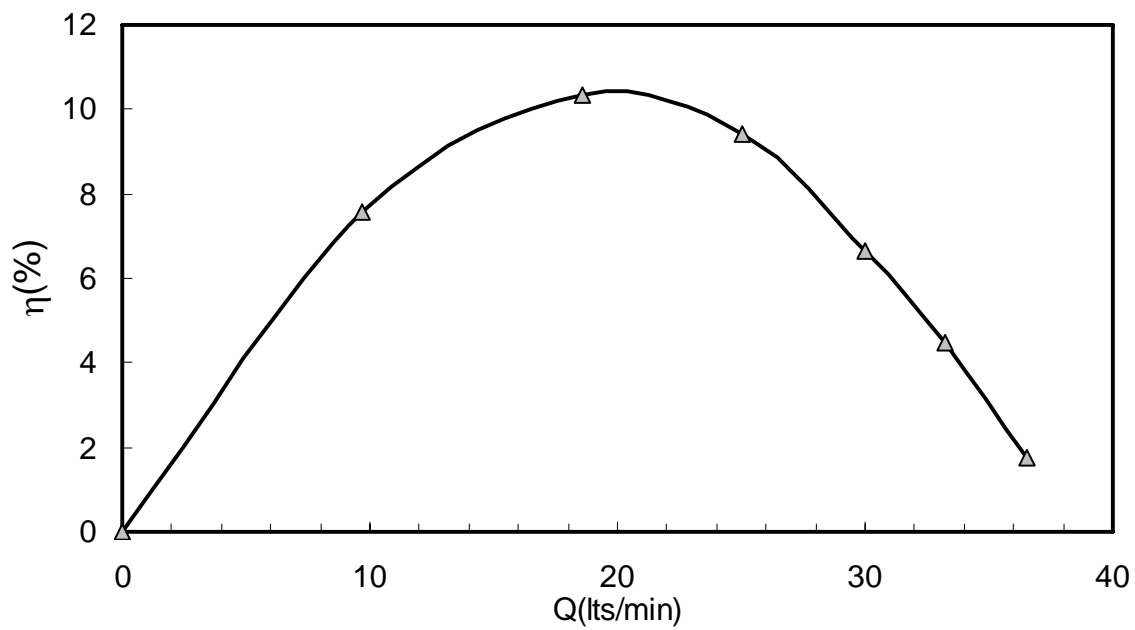


Fig 5-24 Curva experimental de rendimiento – caudal para la bomba No 1

Experimento No 2

Para la bomba No 3 ubicada en el banco de experimentación realizar la las curvas características correspondientes a:

Altura, potencia consumida, potencia hidráulica y rendimiento en función del caudal

Tabla de mediciones para Curvas Características

Bomba No. 3

Fecha: 15 - 11 - 2005

Datos tomados por: Lionel Fernández

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Exp.	Presión		Caudal			Potencia
	hs	p _D	C _i	C _f	t	P _{elec.}
	Cm	lbs/in ²	cm	cm	s	W
1 válvula abierta	30.2	2	208	228	161	285
2	31.5	4	208	228	170	295
3	33.0	8	208	228	187	310
4	37.2	18	208	228	249	348
5	40.0	26	208	228	371	400
6 válvula cerrada	42.7	44	-----	-----	-----	520

Descripción de columnas

- (1) Número del experimento.
- (2) hs altura de presión en la entrada de la bomba en cm de agua.
- (3) p_D presión en la salida de la bomba en lbs/in².
- (4) c_i cota inicial para la determinación volumétrica del caudal, en cm.
- (5) c_f cota final para la determinación volumétrica del caudal, en cm.
- (6) t tiempo transcurrido para la determinación volumétrica del caudal, en segundos.
- (7) P potencia eléctrica consumida por el grupo motobomba, en vatios.

Cálculo de curvas características

Bomba No. 3

Fecha: 04-11-2005

Cálculos realizador por: Lionel Fernández

(1)	(8)	(9)	(10)	(11)
Exp.	H_B	Q	$P_{hid.}$	η
	(m)	(lts/min)	(W)	(%)
1	1.41	36.52	6.59	2.31
2	2.81	34.59	14.12	4.79
3	5.63	33.03	28.59	9.22
4	12.67	23.61	47.42	13.63
5	18.30	15.84	46.33	11.58
6	30.96	0.00	0.00	0.00

$$\text{col. (8)} \rightarrow H_B (m) = \frac{p_s}{\gamma} - \frac{p_e}{\gamma} = \frac{\text{col.(3)}}{1.422335} - \frac{\text{col.(2)}}{100}$$

$$\text{col. (9)} \rightarrow Q(\text{lts/min}) = \frac{\forall}{t} = \frac{\left(\frac{\text{col.(5)} - \text{col.(4)}}{100} \right) \times 0.49 \times 1000 \times 60}{\text{col.(6)}}$$

$$\text{col.(10)} \rightarrow P(W) = Q \gamma H_B = \frac{\left(\frac{\text{col.(9)}}{1000 \times 60} \right) \times 1000 \times \text{col.(8)}}{0.102}$$

$$\text{col.(11)} \rightarrow \eta(\%) = \left(\frac{P_{hid.}}{P_{ele.}} \right) = \left(\frac{\text{col.(10)}}{\text{col.(7)}} \right) \times 100$$

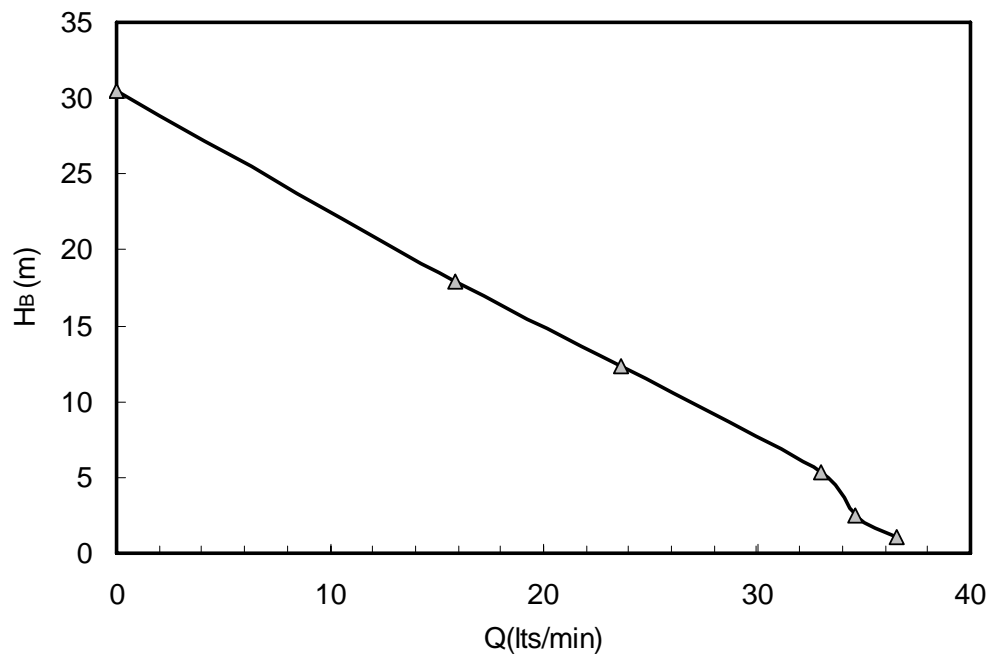


Fig 5-25 Curva experimental de altura – caudal para la bomba No 3

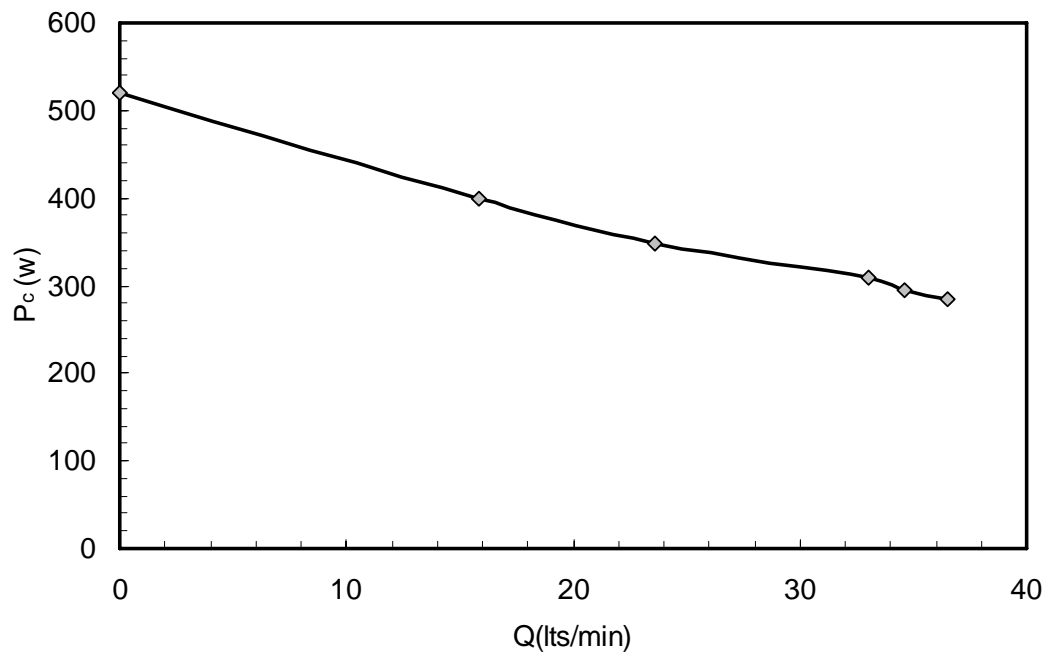


Fig 5-26 Curva experimental de potencia eléctrica consumida – caudal para la bomba No 1

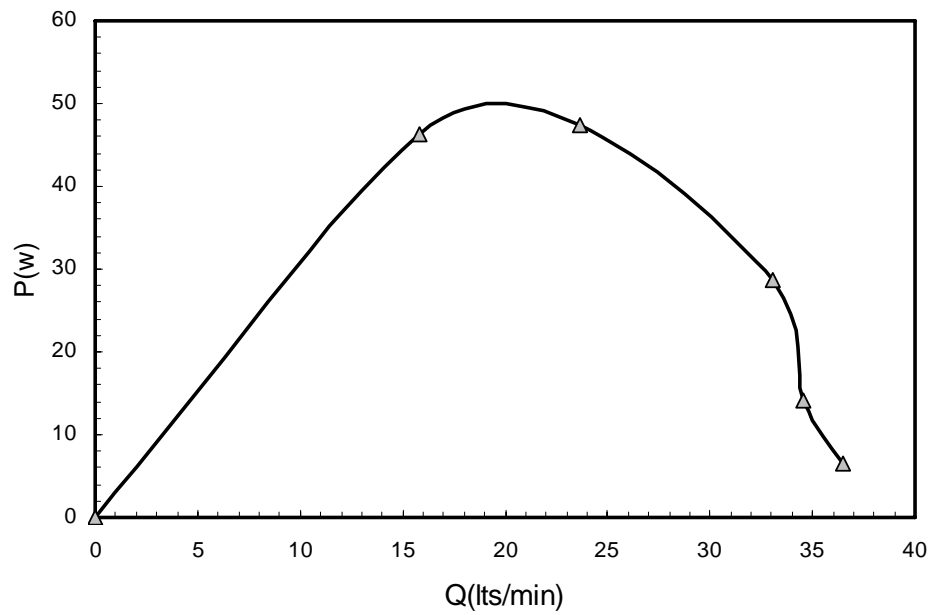


Fig 5-27 Curva experimental de potencia hidráulica – caudal para la bomba No 3

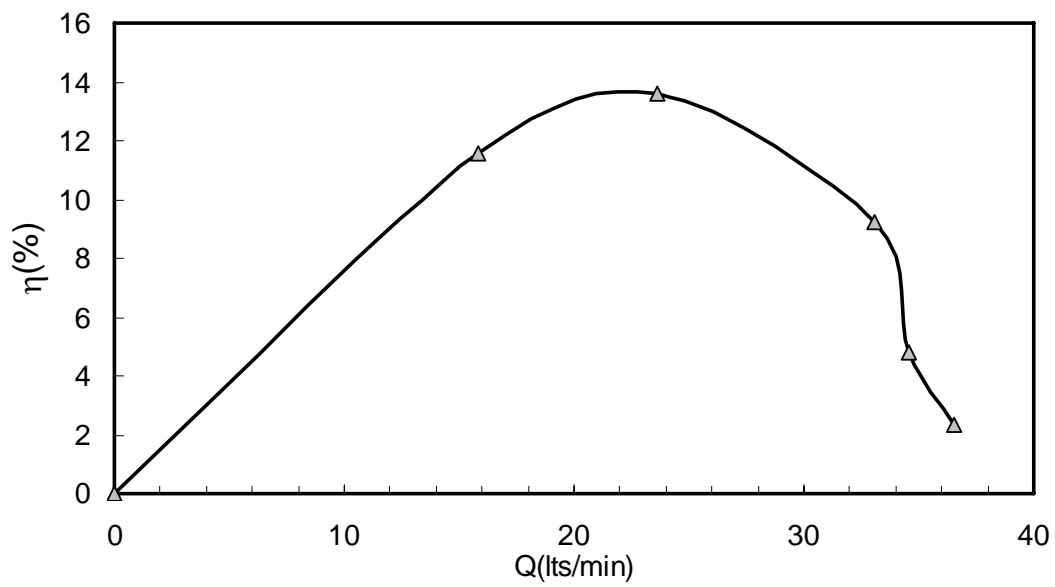


Fig 5-28 Curva experimental de rendimiento – caudal para la bomba No 3

Experimento 3

Línea de energía

Para las bombas No 2 y No 3 ubicadas en el banco de experimentación se pide:

1. Dibujar la instalación indicando sus cotas y progresivas.
2. Determinar las presiones en los puntos B, C, G y H.
3. Dibujar la línea de energía y la de presión dinámica para la instalación.

Mediante mediciones realizadas en el banco de experimentación se obtiene la siguiente información:

(1) Punto	(2) Progresiva (horizontal)	(3) Cota (vertical)	(4) Descripción
---	---	0.000	Piso
T ₁	0.000	1.432	Superficie del tanque No 1
A	0.000	1.036	Inicio de la tubería
V ₁	0.185	1.036	Válvula esférica No 1
B	0.254	1.036	Manómetro en la succión de la bomba No 2
B ₂	0.365	1.036	Centro de la bomba No 2
C	0.365	1.150	Manómetro en la descarga de la bomba No 2
D	0.365	1.225	Codo de 90°
V ₂	0.573	1.225	Válvula esférica No 2
E	0.710	1.225	Codo de 90°
F	0.710	1.036	Codo de 90°
V ₃	0.860	1.036	Válvula esférica No 3
G	0.930	1.036	Manómetro en la succión de la bomba No 3
B ₃	1.045	1.036	Centro de la bomba No 3
H	1.045	1.192	Manómetro en la descarga de la bomba No 3
V ₄	1.045	1.270	Válvula esférica No 4
I	1.045	1.560	Codo de 90°
CH ₁	1.240	1.560	Válvula Check No 1
J	1.410	1.560	Final de la tubería
T ₂	1.410	1.932	Superficie del tanque No 2

Descripción de columnas

- (1) Punto característico considerado.
- (2) Progresivas, distancia medida horizontalmente desde el inicio del tanque T₁ hasta el punto considerado.
- (3) Distancia vertical desde el piso hasta el punto considerado.
- (4) Descripción del punto considerado.

Con las progresivas y cotas indicadas en la tabla anterior se dibuja la instalación como se muestra en la Fig. 5-29.

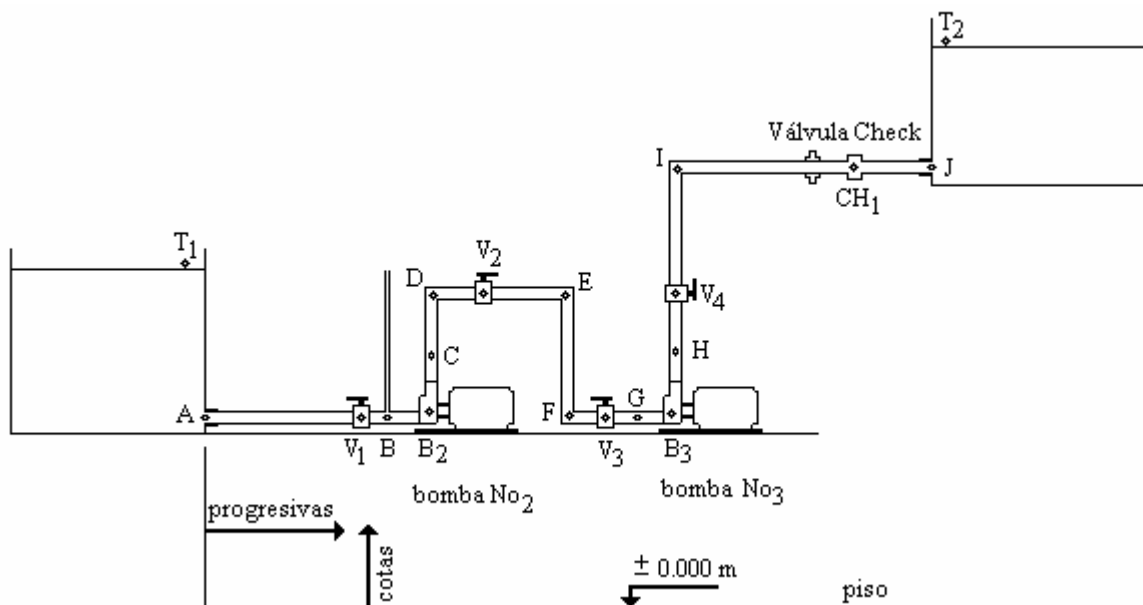


Fig. 5-29 Esquema de la instalación indicando sus puntos característicos.

Datos de presiones

(1)	(5)	(6)
Punto	Lectura	Observación
B	39 cm	
C	11 lbs/in ²	
G	11 lbs/in ²	
H	26 lbs/in ²	

Datos para determinar el caudal

Cota inicial del tanque volumétrico = 2.08 m

Cota final del tanque volumétrico = 2.28 m

Tiempo transcurrido = 221 s

$$Q = \frac{\forall}{t} = \frac{(2.28 - 2.08) \times 0.49 \times 1000 \times 60}{221} = 26.61 \text{ lts/min}$$

La velocidad media es según la ecuación de continuidad es

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{\left(\frac{26.61}{1000 \times 60} \right)}{\left(\frac{\pi}{4} 0.028^2 \right)} = 0.72 \text{ m/s}$$

La energía cinética es igual a

$$\frac{V^2}{2g} = \frac{0.72^2}{2 \times 9.81} = 0.03 \text{ m}$$

lo que podría considerarse como despreciable en comparación con los valores de las alturas de presión.

(1)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
Punto	lectura	Altura Piezométrica (m)	Cota Punto (m)	Cota Piezométrica (m) desde el piso	Observación
T ₁				1.432	Superficie tanque (T ₁)
B	39 cm	0.390	1.036	1.426	piezómetro
C	11 lbs/in ²	7.730	1.150	8.880	Manómetro
G	11 lbs/in ²	7.730	1.036	8.766	Manómetro
H	26 lbs/in ²	18.280	1.192	19.472	Manómetro
T ₂				1.920	Superficie Tanque (T ₂)

Descripción de columnas

col. (7) Lectura de presión en el piezómetro o manómetro instalado en el equipo experimental.

- Col. (10) Cota de la línea piezométrica col. (8) + col. (9).

NOTA: se considera la cota de la línea de energía igual a la piezométrica ya que el termino de energía cinética es despreciable.

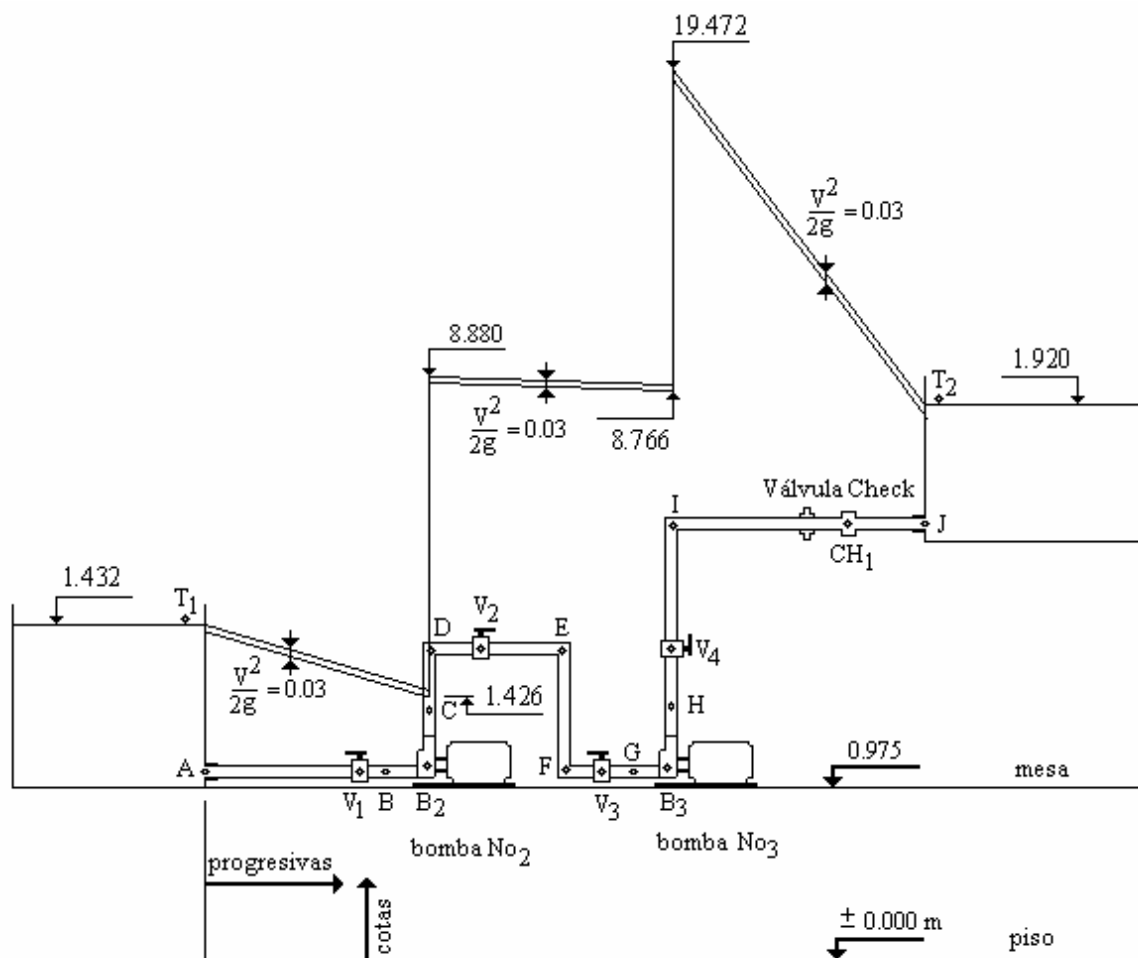


Fig. 5.30 Línea de energía y piezométrica

NOTA:

Por no tener manómetros instalados antes y después de codos, válvulas esféricas y válvulas check no se puede dibujar la línea de energía con detalle, indicando las pérdidas concentradas o menores.

Bibliografía

AMANCO DE COSTA RICA, S.A.(1999), Manual Técnico para Tuberías de Plástico.

Arocha, Simón (1977).Abastecimientos de Agua, Teoría y Diseño. Ediciones Vega.

Osers, Harry (1987). Recopilación de Detalles Típicos de Obras Civiles. Quinta Edición. Impreso en: Refolit C.A.

Méndez Manuel Vicente (1965). Tuberías a Presión en los Sistemas de Abastecimientos de Agua. Universidad Católica Andrés Bello. Facultad de Ingeniería. Caracas.

Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Instituto Nacional de Reforma y Desarrollo Agrario. (1985) Normas Para Proyectos de Riego por Aspersión. Madrid.

Ministerio de Sanidad y Asistencia Social (1962). Normas Sanitarias para Proyecto, Reparación y Reforma de Edificios. Gaceta Oficial de la Republica de Venezuela, N° 752. Extraordinario. 26 de febrero de 1962.

Ministerio de Sanidad y Asistencia Social (1965). División de Acueductos Rurales. Manual de Procedimientos. Caracas.

Werner Herz Muller (1977). Tuberías a Presión. CIDIAT.

Saldarriaga V, Juan G (2001). Hidráulica de Tuberías. Editora Emma Ariza H.